

PROYECTO FIN DE MÁSTER

“APLICACIÓN DE FOTOGRAFÍA DIGITAL AUTOMATIZADA EN GEOMORFOLOGÍA: DINÁMICA MORFO- SEDIMENTARIA EN RÍOS DE GRAVAS”

Autor: Efrén Muñoz Narciso

Directores: Dr. Damià Vericat Querol

Dr. Miguel Ángel Saz Sánchez

Máster Universitario en

**Tecnologías de la información geográfica para la ordenación del territorio:
sistemas de información geográfica y teledetección**

Septiembre de 2014



**Departamento de Geografía
y Ordenación del Territorio**



RESUMEN

El desarrollo de modelos topográficos es fundamental para la caracterización de superficies, para el estudio evolutivo de éstas, y para la parametrización de modelos. En este trabajo se presenta un flujo de trabajo completo para la obtención de información topográfica y ortofotos mediante la aplicación de técnicas de fotogrametría digital automatizada o Structure from Motion (SfM). Esta metodología se ha aplicado en un tramo de 13-km del Alto Cinca. Se han obtenido numerosas fotografías aéreas de proximidad y se ha establecido una red de 203 puntos de control (GCPs). Se ha estudiado el efecto del número de puntos de control (GCPs) y su distribución espacial sobre la calidad de la información topográfica resultante. Los resultados indican como la utilización de 61 GCPs (4.7 GCPs por quilómetro lineal de río, 0.13 GCPs/ha) garantiza errores relativamente bajos de georreferenciación (0.10 m) y calidades aceptables en la topografía obtenida (0.5 m). Por su parte, la localización de los GCPs también puede determinar la calidad de la información topográfica. Se considera el patrón de distribución perimetral como el patrón óptimo para minimizar el tiempo de posicionamiento de los GCPs, garantizando, a su vez, errores de georreferenciación relativamente bajos (0.13 m) y calidades aceptables (0.28 m). Finalmente, la comparación de observaciones topográficas obtenidas mediante SfM y las adquiridas mediante Láser Escáner Terrestre en dos zonas test, muestra como la complejidad topográfica de las superficies puede determinar la magnitud de los errores. De manera específica, los datos topográficos obtenidos en superficies lisas presentan una mejor calidad que los adquiridos en superficies rugosas (errores medios de 0.4 y 0.6 m, respectivamente). La fotogrametría digital automatizada es una técnica que está siendo ampliamente utilizada en multitud de áreas de conocimiento, aunque su correcta utilización requiere de un diseño metodológico específico y flujos de trabajo complejos para minimizar los errores y aumentar la calidad de la información resultante en base a las particularidades de las áreas de estudio y a los objetivos específicos de los estudios.

Palabras clave: topografía, fotogrametría, SfM, puntos de control, GCPs, análisis de errores, georreferenciación, complejidad topográfica, calidad, río Cinca.

ABSTRACT

The development of topographic models is essential for the characterization of surfaces, for the study of topographic changes and to support modeling. In this project we present and evaluate a complete workflow to develop orthophotos and topographic point clouds by means of automatic digital photogrammetry or Structure from Motion (SfM). This methodology has been applied on a 13-km river reach of the Upper Cinca. Thousands of close-range high resolution aerials were taken. A total of 203 ground control points (GCPs) were established. The obtained topographic data was analyzed to determine the effect of the number of control points (GCPs) and their spatial distribution on the quality of the resulting information. The results indicate how the use of 61 GCPs (4.7 GCPs /km, 0.13 GCPs / ha) ensures relatively low georeferencing errors (0.10 m) and acceptable quality in the obtained topography (0.5 m). Results show as the location of the GCPs can also determine the quality of the topographic data. A distribution of GCPs following the perimeter of the study reach provide the optimal solution since it reduces the time involved in the location of the GCPs and, additionally, present relatively low georeferencing errors (0.13 m) and an acceptable data quality (0.28 m). Finally, the comparison of survey observations obtained by means of SfM and Terrestrial Laser Scanning acquired in two test areas shown as topographic complexity of the surfaces can determine the magnitude of the errors. Specifically, the survey data obtained on smooth surfaces has better quality than those obtained on rough surfaces (mean errors of 0.4 and 0.6 m, respectively). Automated digital photogrammetry is a technique that is widely used, but their proper use requires a specific methodological design and complex workflows to minimize the errors and increase the quality of the resulting information based on the particularities of the study areas and the specific objectives of the studies.

Key words: surveys, photogrammetry, SfM, ground control points, GCPs, errors, georeferencing, topographic complexity, quality, Cinca river.

ÍNDICE

1. Introducción.....	pág. 11
1.1. La importancia de los Sistemas de Información Geográfica y la Teledetección en los estudios de geomorfología.....	pág. 12
1.2. Métodos y técnicas para la obtención de información topográfica de elevada resolución: avances y nuevas oportunidades	pág. 13
1.3. Objetivos del Trabajo Final de Máster	pág. 16
2. Área de estudio	pág. 18
2.1 El tramo alto del río Cinca: particularidades y oportunidades.....	pág. 19
2.2 El Alto Cinca. Análisis SIG para su caracterización	pág. 21
2.2.1 Red de drenaje	pág. 21
2.2.2 Análisis del relieve	pág. 22
2.2.3 Usos del suelo	pág. 24
2.2.4 Geología.....	pág. 25
2.2.5 Clima.	pág. 27
2.2.6 Hidrología.	pág. 28
2.2.7 Dinámica morfológica e impactos	pág. 32
2.2.7.1 Morfodinámica.	pág. 32
2.2.7.2 Impactos antrópicos.....	pág. 34
3. Metodología y diseño experimental	pág. 36
3.1 Obtención de datos topográficos a escala de tramo.....	pág. 37
3.1.1 Diseño experimental y adquisición de datos.....	pág. 37
3.1.2 Post-procesado: aplicación de técnicas de fotogrametría digital automatizada.....	pág. 40
3.1.3 Post-procesado: regularización de la información.....	pág. 43
3.2 Análisis de errores	pág. 45
3.2.1 Errores asociados a la densidad de puntos de control.....	pág. 46
3.2.2 Errores asociados a la distribución espacial de los puntos de control	pág. 46
3.3 Validación de los modelos topográficos.....	pág. 49
3.3.1 Adquisición de datos de campo mediante Láser Escáner Terrestre.....	pág. 49
3.3.2 Post-proceso de la información y comparación de la información topográfica	pág. 50
4. Resultados	pág. 52
4.1 Obtención de nubes de puntos, ortofotos y modelos topográficos	pág. 53
4.1.1 Nube de puntos: fotogrametría digital automatizada.....	pág. 53
4.1.2 Ortofoto de alta resolución	pág. 56
4.1.3 Filtro de la información y generación de modelos 2D.....	pág. 57
4.2 Análisis de errores	pág. 59
4.2.1 Efectos de la densidad de puntos de control	pág. 59
4.2.2 Efectos de la distribución espacial de los puntos de control.....	pág. 61
4.3 Validación de los modelos a partir de datos obtenidos con Laser Escáner Terrestre	pág. 62
4.3.1 Comparación de la nube de puntos en superficies lisas.....	pág. 62
4.3.2 Comparación de la nube de puntos en superficies rugosas.....	pág. 63
5. Aplicabilidad: fotogrametría digital automatizada y geomorfología	pág. 64
6. Conclusiones.....	pág. 69
7. Bibliografía.....	pág. 72

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Evolución del número de artículos publicados en revistas indexadas (SCI) por año que contengan las palabras clave geomorfología y SIG o Teledetección en los últimos 20 años. (Fuente: <http://apps.webofknowledge.com/>).....pág. 12

Figura 2. Relación de técnicas para la obtención de topografía en función de la densidad de observaciones topográficas necesarias para una correcta representación de diferentes formas fluviales asociadas a distintas escalas espaciales (modificado de Brasington et al., 2012).

.....
pág. 14

Figura 3. Láser Escáner Terrestre y UAV tomando datos en una zona de cárcavas del pirineo aragonés. En el caso del UAV se puede observar la cámara ubicada en la parte inferior. La cámara captura fotografías de manera automática a una frecuencia de 5s. Estas fotografías se utilizan para la obtención de información topográfica mediante la aproximación de SfM. La calidad de los modelos se compara con la información obtenida con TLS (foto tomada por Smith & Vericat -verano 2013- en el marco de BadlandScan II; zona de badlands en la proximidades del Pueyo de Araguás: alto Cinca).....pág. 16

Figura 4. (A) Esquema de localización del tramo de estudio en el Alto Cinca (Pirineo Central, Huesca España). (B) Ortofoto (15/10/2013 y resolución 0.05m) del tramo de estudio de 13km donde se observa la morfología típica de un río de gravas de montaña y (C) perfil longitudinal del alto Cinca desde cabecera hasta el Embalse de Mediano.....pág. 20

Figura 5. Red de drenaje del Alto Cinca: representación de las subcuenca y ríos principales generados a partir de un área mínima de drenaje de 22 km²pág. 22

Figura 6. (A) Modelo digital de elevaciones y distribución de elevaciones por superficie y (B) Mapa de pendientes (en grados) y distribución por superficie en el Alto Cinca.....pág. 23

Figura 7. Fotografía del río Cinqueta (principal tributario del alto cinca por el margen izquierdo). Se observa la alta conectividad de las laderas con el cauce. Significativo aporte sedimentario mediante procesos activos de ladera hacia un cauce de tipo “wandering”, afectado históricamente por actividades mineras (Fecha 16/03/2014, foto de autor).....pág. 24

Figura 8. (A) Cartografía de los usos del suelo en el Alto Cinca. (B) Distribución porcentual. (C) Superficie de los usos de suelo. Fuente datos: *Corine Land Cover*, 2006. Elaboración propia.....pág. 25

Figura 9. Cartografía y superficie de la litología del Alto Cinca y fallas. Fuente datos: Centro de información territorial de Aragón (CINTA). Elaboración propia..pág. 26

Figura 10. Localización y pluviometría (precipitaciones acumuladas mensuales serie 2000-2012) de dos estaciones meteorológicas del alto Cinca (Datos climáticos: SAIH; elaboración propia)..pág. 27

Figura 11. Localización de la estación de aforos EA-51 en la ortofoto del tramo de estudio (izquierda, sección en línea roja). Esquema en planta de la sección transversal de la estación de aforos (derecha). Fuente: SAIH-CHE.....pág. 28

Figura 12. Esquema de la red de Centrales Hidroeléctricas, Presas, Azudes y Galerías de conexión en el Alto Cinca. La CH de Laspuña tiene la salida dentro del tramo de estudio (recuadro rojo) y una capacidad máxima de desagüe de 25 m³/s. Fuente: Acciona.....pág. 29

Figura 13. Hidrograma de caudales quinceminutales de la EA-051 para una serie temporal de una semana. Se muestra un ejemplo que diferencia la estructura y magnitudes de una respuesta que genera la Central Hidroeléctrica de Laspuña (recuadro rojo), en comparación con dos crecidas de pequeña magnitud (recuadro negro).....pág. 30

Figura 14. Aportaciones anuales (Hm^3) para la serie 1959-1993 (EA-051).....pág. 30

Figura 15. (A) Promedio mensual del Caudal medio mensual y (B) promedio mensual de aportaciones para la serie 1959-1993 (EA-051).....pág. 31

Figura 16. Fotogramas y ortofotos (1927-1977-1997-2013) de unos de los tramos del área de estudio próximos a Aínsa. Se observan marcados cambios morfológicos en este tramo del Cinca, indicando el dinamismo de un río trenzado por distintas perturbaciones de diferente carácter, natural (crecidas) y antrópico (extracciones de áridos y escolleras). El término *braiding index* se refiere al índice de multiplicidad de canales que se puede expresar como el cociente entre la longitud de los canales y la longitud del cauce principal. A mayor el índice mayor la complejidad de canales a lo largo de la llanura de inundación.....pág. 32

Figura 17. Fotografía de un tramo del alto Cinca en las proximidades de Labuerda (foto D. Vericat, verano de 2014). En la fotografía se observa el alto relieve de las barras y la erosión lateral en estas (i.e. incisión del cauce), y una secuencia de rápido-poza característica del tramo

Figura 18. (A, B, C) Ortofotos de 0.1m de resolución generadas a partir de técnicas de fotogrametría digital automatizada. (D, E, F) Fotografías de tomadas en campo durante la actuación. Se observa las modificaciones por fases (morfología y topografía) en la zona afectada entre Diciembre de 2013 y Marzo de 2014 (Escalona, Alto Cinca).....pág. 35

Figura 19. Flujo de trabajo para la obtención de modelos topográficos del cauce seco mediante fotografía digital automatizada (SfM).....pág. 39

Figura 20. Errores en la nube de puntos una vez realizada la alineación debido a las alas del autogiro de las imágenes originales...

Figura 21. Generación de la nube de puntos a partir de una alineación en coordenadas locales...

Figura 22. Flujo de trabajo específico correspondiente al proceso de georreferenciación de la nube de puntos en el Agisoft PhotoScan Pro ® 1.0.0 (A) Identificación visual de los puntos de control en cada fotografía. (B) Ajuste del sistema de coordenadas aplicados a los puntos de control (markers). (C) Ubicación de las dianas en una ortofoto de referencia (este simple ejercicio, aunque se base en ortofotos de años anteriores es de gran utilidad para la localización de las dianas en las fotos de nueva adquisición). (D) Visualización de los GCPs en el tramo e importación de las coordenadas.....pág. 42

Figura 23. Ejemplo de *color correction* en el proceso de generación de una ortofoto a una resolución de 0.05 m. Las diferencias son claras entre la imagen de la izquierda (desactivado) y de la derecha (activado). La mayor corrección de brillo la aplica en elementos estáticos y vegetación (recuadro rojo)

Figura 24. Diagrama de flujo del algoritmo ToPCAT para la regularización de nube de puntos de manera óptima y rápida (extraído de Brasington et al., 2012).....pág. 44

Figura 25. (A) Análisis de errores asociados a la densidad de los puntos de control para el post-proceso. (B) Análisis de errores asociados a la distribución espacial teniendo en cuenta 4 patrones geométricos de estudio.....pág. 48

Figura 26. Metodología del proceso de validación de la nube de puntos topográfica obtenida mediante SfM: (A) adquisición y (B) post-proceso de datos TLS y comparación de valores topográficos. Se considera la información TLS como puntos del terreno reales.....pág. 51

Figura 27. Resultados obtenidos a partir de fotografías aéreas digitales aplicando SfM. (A) Nube de puntos topográfica del cauce del tramo de estudio (13 km). Nube de puntos con (A.1.1) baja y (A.1.2) media densidad a escala de tramo y a escala de barra (A.2 y A.2.1). Cabe destacar que las observaciones topográficas se han coloreado a partir de los valores RGB de la fotografía; por este motivo y por la elevada densidad parece que se trata de una fotografía aunque representa la nube de puntos. (A3) Modelo Digital de Elevaciones sin regularización ni filtrado de la información topográfica. (A4) Valores de densidad de las nubes de puntos obtenidas a escala de tramo y de barra. (A5) Errores cuadráticos medios asociados al post-procesado y obtención de la información topográfica. (B) Visualización en varias escalas de la ortofoto generada de altísima resolución (5 cm). Todos los resultados georreferenciados en ETRS 89 HUSO 31N.....pág. 55

Figura 28. Ejemplo de la información topográfica 3D obtenida a partir de la aplicación de la metodología que se presenta en este trabajo: (A) zona de inicio de tramo de estudio (aguas arriba); puente de Laspuña; y (B) zona final de tramo de estudio (aguas abajo); puente de Ainsa.....pág. 56

Figura 29. (A) Ortofoto a escala de barra en las proximidades del camping Peña Montañesa. (B) Modelo Digital del Terreno (MDT) con una resolución de 0.5 metros generado a partir de los valores de elevación mínima (Z_{min}) calculados con TopCat (malla de 0.5 x 0.5 metros). (C) Ejemplo de identificación de vegetación automática mediante la aplicación de la desviación estándar modificada (detrended standard deviation). En este caso se ha ampliado la malla de análisis a 1 metro. El modelo inicial se ha reclasificado y tan solo se representan aquellas celdas con desviaciones modificadas superiores a los 20 cm. Se considera que estas celdas representan la vegetación tal y como se observa al comparar su distribución con la ortofoto de (A). Es importante tener en cuenta (i) el área de análisis; que corresponde al polígono que determina el Modelo Digital del Terreno en (B). (ii) No se ha aplicado ningún factor correctivo de refracción para la obtención de la información batimétrica (cauce mojado).....pág. 58

Figura 30. Distribución de los errores cuadráticos medios de los puntos de control (error de post-proceso o georreferenciación) y de los puntos test o *check* (calidad o exactitud del modelo). Se parte de un escenario óptimo con 203 GCPs. El último escenario analizado dispone de 20 GCPs para el post-proceso de la información y 183 puntos test. La selección de los puntos se ha realizado de manera aleatoria y a partir de la *Split Test Approach* (división de los puntos de control; ver metodología).....pág. 59

Figura 31. Distribución de los errores cuadráticos medios de las 3 coordenadas (x,y,z) de los puntos de control (error de post-proceso o georreferenciación). Se parte de un escenario óptimo con 203 GCPs. El último escenario analizado dispone de 20 GCPs para el post-proceso de la información y 183 puntos test. La selección de los puntos se ha realizado de manera aleatoria y a partir de la *Split Test Approach* (división de los puntos de control; ver metodología).....pág. 60

Figura 32. Distribución de los errores cuadráticos medios de los puntos de control (error de post-proceso o georreferenciación) y de los puntos test o *check* (calidad o exactitud del modelo) en función de los distintos patrones de distribución espacial de los GCPs. Se han utilizado 102 GCPs para el post-proceso y 101 puntos test para el cálculo de la exactitud de los datos topográficos.....pág. 61

Figura 33. Curva de frecuencias acumulada de la longitud de los vectores resultantes al comparar observaciones topográficas obtenidas mediante SfM (Obs SfM) y TLS (Obs TLS). Se presentan dos curvas para las dos superficies evaluadas: (i) superficie lisa y (ii) superficie rugosa.....pág. 63

Figura 34. Información topográfica en superficies de difícil acceso: glaciares. (A) localización del glaciar del Mte Perdido. (B) fotografía del cuerpo glaciar. (C) nube de puntos generada de baja densidad. (D) nube de puntos generada de media densidad (F). Ortofoto (resolución: 0.29 m). Productos obtenidos en coordenadas locales. Fecha imágenes y productos generados: 14/06/2014.....pág. 65

Figura 35. Comparación de Modelos Digitales del Terreno (DoD) en el Alto Cinca (escala de barra, zona del camping Peña Montañesa). Se comparan los modelos obtenidos en junio y octubre de 2013, después de un período con caudales de elevada magnitud y competentes. Se presenta la ortofoto de 5 cm de resolución y el MDT de octubre de 2013 como referencia

.....pág 67

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Características generales del tramo de estudio en la cuenca del Alto Cinca.....pág. 19

Tabla 2. Características de la estación de aforos EA-51 de la que se han extraído los datos de caudal para el contexto hidrológico del tramo de estudio. Fuente: SAIH-CHE.....pág. 28

Tabla 3. Relación de Q/Periodo de retorno calculado aplicando 3 métodos diferentes y la media. Los cálculos se realizan para la serie (1959-1993) de la EA-051. Fuente: CEDEX.pág. 31

Tabla 4. Características de las imágenes obtenidas, de la cámara de fotos utilizada y altura del vuelo realizado en octubre de 2013. El post-proceso de esta información ha proporcionado información topográfica de elevada densidad.....pág. 53

AGRADECIMIENTOS

Cuando llega el momento donde escribes algún tipo de trabajo o documento, en este caso, de investigación, y ves que el resto de trabajos tiene un apartado llamado: *agradecimientos*, a uno le llama la atención. Todos sabemos que este punto es de los primeros en el que el lector se fija, quizás incluso, antes que el título. Por ello, con toda la sinceridad y humildad escribiré estas palabras a las siguientes personas, agradeciendo:

A mis padres y mis hermanos (Tere, Paco, Rebe, Rubi e Rafa, como non). A todos y cada uno de ellos, por criarme, educarme y formarme, con el inmenso esfuerzo y lucha que ello supuso. Moítimas grazas.

A Damià. Escribiría 100 páginas de halagos, no quiero aburrir. Ojalá cada joven investigador tuviese un supervisor o tutor como él. Las cosas van mucho más allá de la valía investigadora. Cuando en este caso, la calidad personal supera a la investigadora, no hay más que decir. Gracies cap, de veritat.

A los que formamos parte de MorphSed y RIUS: un equipo de investigación, un grupo de trabajo, un grupo de amigos. Chicas y chicos, gracias por aguantarme todos y cada uno de los días. Sois grandes.

Zaragoza, a M.A. Saz por la paciencia y cortesía en todos los cambios que sufrió el rumbo de este PFM. A Juan de la Riva, porque profesores y coordinadores como él están en peligro de extinción. A los amigos y compañeros de licenciatura y Máster, especialmente, Miki y Leyre. Al departamento de Geografía y Ordenación del Territorio en general, por la buena capacidad formativa de la mayoría de sus docentes, y particularmente por haber desarrollado el Máster en Tecnologías de la Información Geográfica para la Ordenación del Territorio: SIG y Teledetección, al que se asocia este proyecto.

Santiago de Compostela, aos amigos xeógrafos, por 4 anos inolvidábeis e amizades de por vida. Alumnos y profesores. Chemiña, Horacio, Marcos, Rafa...porque tienen mucha culpa de todo esto.

Pontevedra, a mis amigos. Sobre todo, por aguantarme. Graciñas meus.

Formalmente, al proyecto MorphSed CGL2012-36394 financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad al que se asocia el trabajo que aquí presento. También al Instituto Aragonés de Ciencias Ambientales de Aragón (IUCA- Universidad de Zaragoza) por el apoyo a los jóvenes que quieren empezar la carrera investigadora mediante sus programa de becas.

Por último, a Laura.

ACRÓNIMOS

- BP: del inglés, Before Present.
- CHE: Confederación Hidrográfica del Ebro.
- CINTA: Centro de Información Territorial de Aragón.
- CLC: del inglés, Corine Land Cover.
- CNIG (Centro Nacional de Información Geográfica).
- DANA: depresión aislada a niveles altos. (ver gota fría).
- DEM: del inglés, Digital Elevation Index.
- DoD: del inglés, DEMs of Difference.
- ETRS: del inglés, European Terrestrial Reference System.
- Q: caudal (en m^3/s).
- Qc: caudales máximos medios diarios mensuales (en m^3/s).
- Qci: caudales máximos instantáneos (en m^3/s).
- Qmd: caudales medios diarios (en m^3/s).
- GCP: del inglés, Ground Control Point.
- GPRS: del inglés, General packet radio service.
- GPS: del inglés, Global Position System.
- IGN: Instituto Geográfico Nacional.
- k.a: miles de años.
- LiDAR: del inglés, Light Detection and Ranging.
- M.A: millones de años.
- MDS: Modelos Digitales de Superficie.
- MDT: Modelos Digitales del Terreno.
- msnm: metros sobre el nivel del mar mediterráneo.
- MVS: del inglés, Multi View Stereo.
- PFM: Proyecto Fin de Máster.
- RAM: del inglés, random access memory.
- RGB: del inglés, Red-Blue-Green.
- RMSE: del inglés, Root Mean Square Error (Error cuadrático Medio).
- RTK: del inglés, Real Time Kinematic.
- SAIH: Sistema Automático de Información Hidrológica.
- SCI: del inglés, Science Citation Index.
- SfM: del inglés, Structure from Motion.
- SIG: Sistemas de Información Geográfica.
- SITAR: infraestructura de datos espaciales de Aragón.
- TIG: Tecnologías de la Información Geográfica.
- TLS: del inglés, Terrestrial Laser Scanner.
- ToPCAT: del inglés, Topographic Point Cloud Analysis Toolkit.
- UAV: del inglés, Unmanned Aerial Vehicle.

1. INTRODUCCIÓN

1.1. La importancia de los Sistemas de Información Geográfica y la Teledetección en los estudios de geomorfología

La geomorfología es la ciencia que estudia las formas de la tierra y de los procesos que las controlan y modifican. En los últimos años la geomorfología se ha nutrido de herramientas que han supuesto una verdadera revolución a nivel científico. La aplicación de los Sistemas de Información Geográfica (de aquí en adelante SIG) y la Teledetección es fundamental para el avance en el conocimiento en esta disciplina. El desarrollo de los SIG desde hace unos 30 años, la aparición de las primeras imágenes de satélite y herramientas de teledetección en los años 70 del siglo han creado un nuevo paradigma en la geomorfología, pero también en otras disciplinas. La ecología, la biología, la geología, la geografía, la climatología, la meteorología, etc. son algunas de las grandes áreas que mayor uso han hecho de estas nuevas herramientas.

Específicamente, en el campo de la geomorfología, el SIG y la Teledetección han cambiado totalmente la naturaleza de los estudios en varios aspectos, entre los que cabe destacar los relacionados con: (a) la tipología de estudio: abandonando la geomorfología descriptiva, con múltiple apoyo cartográfico basado en clasificaciones, a una geomorfología cuantitativa, que estudia los procesos (paleo y actuales activos), aplicando un gran número de índices geoestadísticos. (b) La escala: la superficie de estudio se amplía (se reduce la escala), tanto en estudios de tipo descriptivo como cuantitativo. (c) La resolución: entendiendo por ello la superficie de la unidad menor que aporte información (píxel, celda). La resolución está siendo en los últimos años el parámetro que más está evolucionando, lo que conlleva mayor densidad de datos, mayor especificidad y por tanto, una potencial mejora en la calidad de los estudios.

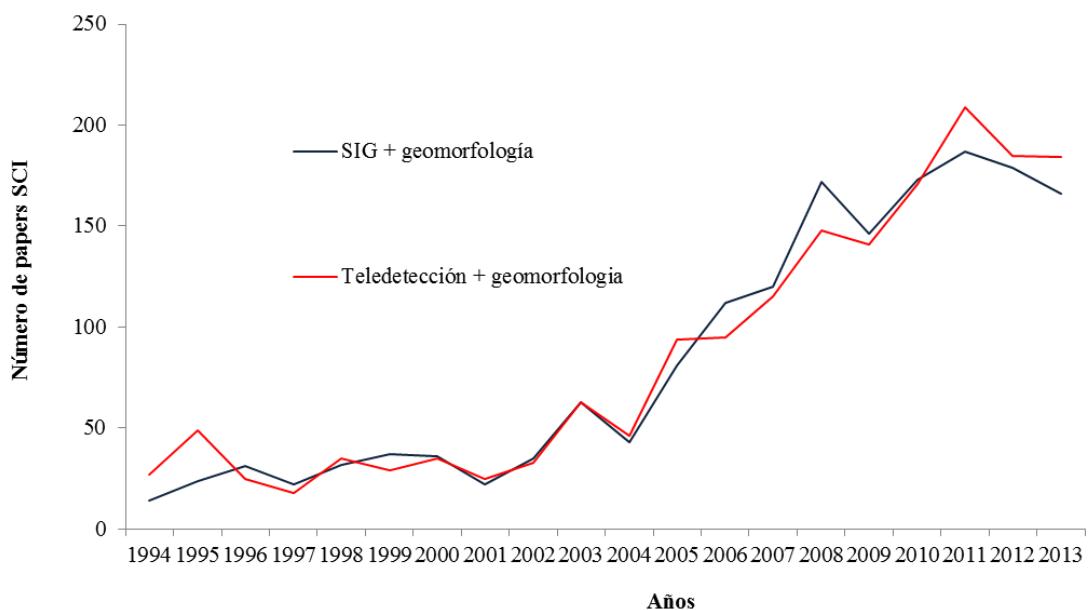


Figura 1. Evolución del número de artículos publicados en revistas indexadas (SCI) por año que contengan las palabras clave geomorfología y SIG o Teledetección en los últimos 20 años.

(Fuente: <http://apps.webofknowledge.com/>)

La aparición de nuevos productos, herramientas y metodologías en los campos de los SIG y la teledetección ha supuesto una revolución en las 2 últimas décadas en cuanto a publicaciones científicas de elevado interés en geomorfología (Figura 1). La figura 1 muestra la

evolución temporal del número de estudios en geomorfología que contengan SIG o Teledetección en los metadatos publicados en revistas indexadas en el Science Citation Index. La tendencia es claramente exponencial aunque existen algunas particularidades interesantes de puntualizar: (a) Existe una fuerte relación e igualdad entre las publicaciones que usan herramientas SIG o Teledetección, lo cual indica que no se excluyen, siendo métodos de naturaleza análoga, y que, en muchas ocasiones su relación las une en una sola herramienta. (b) El crecimiento más exponencial se produce en la última década (universalización-extensión). En los años 90 aún se podrían considerar como estudios pioneros, con elevados costes de uso y aplicación (i.e. instrumental, software, hardware), pero en la última década el aumento exponencial se debe a una mayor accesibilidad a los datos espaciales, costes menores de software y hardware, extensión de los conocimientos y experiencia, mejora e innovación en nuevas técnicas (i.e. Light Detection and Ranging- LiDAR, LiDAR terrestre, etc.; Tarrolli et al., 2009).

En el presente, es casi impensable no aplicar productos, herramientas y metodologías de SIG y de teledetección. La tendencia en el número de publicaciones sigue en aumento y para el año 2014 (hasta Julio) probablemente supere al anterior (el número de artículos que contengan la palabra SIG o teledetección se sitúa en 63 y 60 respectivamente). Además de esta constante mejora, uno de los factores determinantes ha sido la mayor disponibilidad de estas herramientas o metodologías para la comunidad. Es recurrente escuchar entre la comunidad científica que las nuevas oportunidades que ofrecen los SIG y la teledetección poseen un trinomio determinante: elevada resolución, bajo coste y alta rapidez. Por ejemplo, en el campo de la geomorfología fluvial, tradicionalmente, el estudio de los procesos erosivos y de sedimentación de los cauces se limitaba a la comparación de secciones topográficas obtenidas para períodos temporales extensos (años) y a lo largo de tramos pequeños (metros-quilómetro). Actualmente, la diversidad de productos topográficos de libre adquisición (e.g. LiDAR) o la obtención de datos topográficos con equipos y herramientas de post-proceso de bajo coste (e.g. fotogrametría digital automatizada), permite (a) la creación de modelos topográficos 2D (elevada resolución a escalas quilométricas), (b) una rápida obtención de observaciones justo después de episodios de movilidad (bajo coste) y, consecuentemente, (c) una comparación de los modelos para períodos temporales más cortos (rapidez). Además, no hay que olvidar la mejora en el software y hardware, lo que conlleva una reducción del tiempo de post-proceso y análisis de la información. Todo ello está propiciando una universalización del acceso a los productos y a las técnicas, lo que facilita que el científico pueda aplicar sus conocimientos de manera más eficaz aunque, sin ninguna duda, la optimización en la elaboración de productos recae en el trabajo pluridisciplinar (e.g. con informáticos, matemáticos, etc.).

1.2. Métodos y técnicas para la obtención de información topográfica de elevada resolución y densidad: avances y nuevas oportunidades

La elaboración de modelos digitales del terreno (MDT) o superficies (MDS) es fundamental para (a) la caracterización de superficies, (b) para el estudio evolutivo de éstas y (c) para la modelización de éstas o para la parametrización de modelos en los que la topografía sea una variable clave para su desarrollo. La aplicación de estos modelos al estudio de procesos geomorfológicos en la última década ha venido marcada por la aparición de nuevas metodologías y técnicas para la obtención de datos topográficos de elevada resolución y densidad.

Son numerosos los avances en geomática (i.e. integración de medios para la captura, post-proceso, análisis ... y almacenamiento de información geográfica) que han determinado el progresivo aumento de la densidad, resolución y precisión de los datos topográficos: (a) mejora de métodos directos de obtención de datos: de las Estaciones Totales Robóticas a GPS diferenciales, hasta recientemente Láser Escáneres Terrestres o LiDAR terrestres (e.g. Brasington et al., 2000; Heritage & Hetherington 2007; Wheaton et al., 2010; Brasington et al., 2012; Wheaton et al., 2013; Williams et al., 2013a; Williams et al., 2013b), (b) mejora en técnicas de teledetección: vuelos aerotransportados LiDAR, interferometría RADAR (e.g. Charlton et al., 2003; Hilldale & Raff, 2008; Tarrolli, 2014); y (c) mejoras de técnicas indirectas fotogramétricas: de la fotogrametría tradicional a la fotogrametría digital automatizada (Structure from Motion- Multi View Stereo) (e.g. Lane et al., 2000; Westaway et al., 2003; Brasington & Smart, 2003).

La aplicación de estos avances está determinada por la densidad de observaciones mínimas para la caracterización de la unidad objeto de estudio. La figura 2 muestra de manera gráfica esta dependencia para el caso de los medios fluviales. Se puede observar como para la caracterización o modelización de una forma del cauce (*bedform*) son tres las técnicas de obtención de datos topográficos que se pueden utilizar garantizando la densidad mínima para su correcta representación (i.e. 1 punto/m²): Láser Escáner Terrestre, Fotogrametría y GPS. Si la unidad objeto de estudio requiere de una escala espacial más grande (e.g. 100 metros para el caso de las barras fluviales, 0.5 puntos/m²), se mantienen las técnicas anteriores pero aparece un técnica adicional de posible aplicabilidad (i.e. LiDAR). Este diagrama no diferencia el coste en la aplicación de estas técnicas, aunque en algunos estudios puede ser determinante.

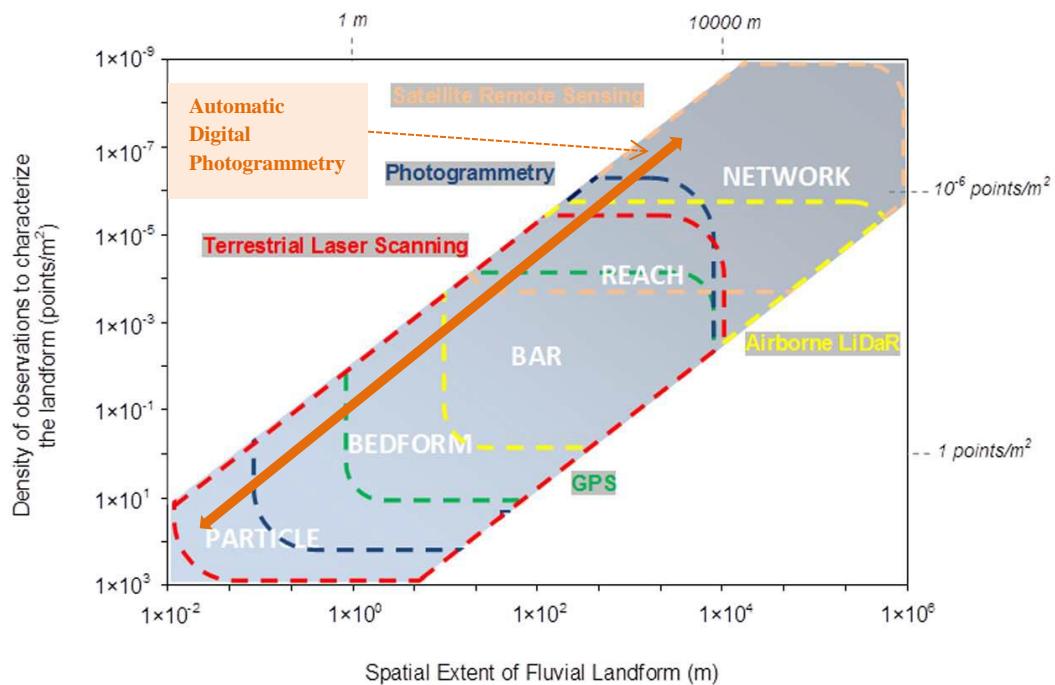


Figura 2. Relación de técnicas para la obtención de topografía en función de la densidad de observaciones topográficas necesarias para una correcta representación de diferentes formas fluviales asociadas a distintas escalas espaciales (modificado de Brasington et al., 2012).

Aunque en la figura se refiera al ámbito fluvial, la relación entre técnicas y escala mínima a representar para la caracterización de distintas formas o unidades se pueden extender a estudios geomorfológicos en general. En la actualidad, los avances en análisis de imágenes y

post-proceso (computación) han desarrollado una novedosa, rápida y económica metodología basada en técnicas fotogramétricas. Se trata de la fotogrametría digital automatizada (Structure from Motion- Multi View Stereo; SfM-MVS). La fotogrametría digital automatizada (SfM+MVS, de aquí en adelante SfM) se basa en la identificación espacial de puntos comunes en pares de fotografías (Ullman, 1979), mediante algoritmos (i.e. SIFT desarrollado por Lowe et al., 2004) se orientan y localizan las cámaras y, consecuentemente, se geolocaliza la nube de puntos ofreciendo información 3D. Respecto de la fotogrametría tradicional, SfM no requiere datos de orientación ni ubicación 3D de las cámaras para la reconstrucción de la escena (Westoby et al., 2012). Además, esta técnica es, junto con las técnicas de láser terrestre (de aquí en adelante TLS), la que mayor versatilidad ofrece para garantizar elevadas densidades de información a escalas espaciales pequeñas (elevada extensión; Figura 2). Su mayor limitación para estudios de escala pequeña recae en (a) la necesidad de utilizar plataformas para la obtención de las fotografías, ya sea fotografías cenitales u oblicuas, y (b) la necesidad del establecimiento de una red de control topográfica sólida para el post-proceso de la información. SfM permite obtener datos topográficos de precisión centimétrica con resoluciones entre el LiDAR y TLS (e.g. Fonstad et al., 2013; Javernick et al., 2014), pero con un coste económico mucho menor (Doneus et al., 2011). La aparición de esta técnica se ha beneficiado del avance en el desarrollo de vehículos aéreos no tripulados (de aquí en adelante UAV). En este último caso, la amplia disponibilidad y uso de estas plataformas ha hecho imprescindible una modificación de la legislación aérea en el estado español. Su amplio uso se debe a la reducción del coste de los UAVs (e.g. hexacopters o drones; Figura 3) y a la mejora del hardware de estos (e.g. GPS y estabilizadores que controlan el vuelo), que a su vez permite su operatividad sin experiencia previa. Así, la principal ventaja de SfM respecto TLS es, además del bajo coste, el ahorro en coste temporal y humano. Con el uso de UAVs ligeros (e.g. drones, globos, cometas, etc.) se puede ampliar la escala espacial y temporal de los levantamientos topográficos (e.g. James & Robson, 2012; Niethammer et al., 2012; Dandois & Ellis, 2013), siendo mucho más cómodo y efectivo que el transporte de pesados y voluminosos equipos de laser escáner terrestre (TLS). Son numerosos los antecedentes en el uso de técnicas SfM para la generación de modelos topográficos a escala de tramo en geomorfología fluvial (e.g. James & Robson, 2012; Fonstad et al., 2013; Javernick et al., 2014; Tamminga et al., 2014). Dichos trabajos muestran como SfM garantiza un bajo coste temporal para la obtención de datos garantizando elevadas resoluciones y densidades, hecho determinante en trabajos donde las tasas de cambio pueden ser rápidas (e.g. cárcavas, ríos trenzados). Aunque la utilización de SfM es amplia en el campo de la geomorfología, existen algunos aspectos que requieren más investigación para mejorar y optimizar los flujos de trabajo de obtención y post-proceso de datos, reduciendo los errores e incertidumbres de la información resultante. En este sentido, tal y como se ha apuntado anteriormente, el establecimiento de los puntos de control topográficos para el post-proceso de las imágenes (georefenciación) es un aspecto fundamental para garantizar la obtención de información topográfica de calidad. Así, en este trabajo final de máster se examina de manera crítica la calidad de la información topográfica obtenida mediante SfM, analizando el efecto de la densidad y distribución espacial de los puntos de control topográficos. Los resultados son de gran interés para futuros diseños experimentales, en los que se pretenda aplicar SfM, para la obtención de MDT o MDS. De la misma forma, se presenta un flujo de trabajo para la obtención de modelos topográficos a escala de tramo (quilométrica), para el estudio de la dinámica morfo-sedimentaria en ríos de gravas mediante SfM. El flujo de trabajo se ha validado en un tramo de 13 km en una zona del alto Cinca. Este estudio se ha realizado en el marco del proyecto MorphSed (www.morphsed.es; financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad; CGL2012-36394).



Figura 3. Láser Escáner Terrestre y UAV tomando datos en una zona de cárcavas del pirineo aragonés. En el caso del UAV se puede observar la cámara ubicada en la parte inferior. La cámara captura fotografías de manera automática a una frecuencia de 5s. Estas fotografías se utilizan para la obtención de información topográfica mediante la aproximación de SfM. La calidad de los modelos se compara con la información obtenida con TLS (foto tomada por Smith & Vericat -verano 2013- en el marco de BadlandScan II; zona de badlands en la proximidades del Pueyo de Araguás: alto Cinca)

1.3. Objetivos del Trabajo Final de Máster

El presente trabajo tiene 3 objetivos claramente diferenciables, aunque con estrecha relación entre ellos.

(O1) Objetivo 1: desarrollo de un flujo de trabajo para la obtención de una nube de puntos topográfica de elevada densidad (10^2 - 10^4 puntos/ m^2) aplicando fotogrametría digital automatizada (SfM) a escala quilométrica. La escala de este estudio no tiene apenas referentes hasta el presente (el estudio de Tamminga et al., 2014 se limita a una escala menor a la del presente trabajo). Adicionalmente, la aplicación de este flujo de trabajo también proporciona la generación de ortofotos de elevada resolución (centimétrica). La obtención de datos se realiza en el tramo alto del río Cinca (Pirineo Aragonés). Cabe destacar la elevada aplicabilidad de este flujo de trabajo, ya que permitirá, en el caso del proyecto en el que se enmarca el trabajo, obtener modelos digitales del terreno para desarrollar múltiples subproductos que analicen en profundidad la complejidad morfológica y sedimentaria, en un tramo del río Cinca con elevadas tasas de cambio por la alta frecuencia de perturbaciones de diferente naturaleza: (a) crecidas naturales, (b) extracciones de áridos asociadas a actuaciones en el cauce.

(O2) Objetivo 2: análisis crítico de (a) los errores de georreferenciación y (b) de la calidad de la información topográfica resultante mediante la aplicación de SfM (O1). El análisis de errores se basa en el estudio del efecto de la densidad y distribución de la red de puntos de control para el post-proceso de las imágenes (e.g. Vericat et al., 2009).

(O3) Objetivo 3: validación de la información topográfica resultante a partir de la aplicación de SfM (O1 y O2) mediante la comparación de ésta con la información topográfica obtenida con Láser escáner terrestre (TLS) en 2 tipos de superficie: (a) lisas y (b) rugosas.

Por último, cabe destacar que para la descripción del área de estudio en la que se han desarrollado los objetivos descritos anteriormente, se han aplicado numerosas técnicas y metodologías aprendidas durante la realización del máster en Tecnologías de la Información Geográfica para la Ordenación del Territorio: SIG y Teledetección. De esta forma, este trabajo también contiene un objetivo de revisión y aplicación para el aprovechamiento de los conocimientos adquiridos durante la realización del master.

2. ÁREA DE ESTUDIO

2.1 El tramo alto del río Cinca: particularidades y oportunidades

El Alto Cinca se sitúa en el Pirineo Central, provincia de Huesca, España. La cuenca del Cinca tiene una superficie de 863 km² (excluyendo la del río Ara) y la longitud del cauce desde la cabecera, en la cara N del Monte Perdido (3.355 msnm) hasta la confluencia con el río Ara, (cola del embalse de Mediano; 520 msnm) es de 65 km aproximadamente (Figura 4 y Tabla 1). El perfil longitudinal (Figura 4C) señala un fuerte gradiente altitudinal, con un desnivel aproximado de 2800 m en tan sólo 65 km, con una pendiente media de 4 % (40 % en los 5 primeros km, donde salva la mayor parte del desnivel). Es un perfil longitudinal tipo de ríos de montaña alpinos, modelados en sus cabeceras por relieves glaciares del Pleistoceno, morfologías tipo del glaciarismo alpino, con glaciares y circos (actuales) colgados por encima de los 2500 msnm, que los sistemas fluviales salvan con torrentes y cascadas hasta el comienzo de los valles glaciares de fondo plano, modelados por los episodios glaciares de mayor importancia y extensión (i.e. Riss, Würm, 220 y 80 k.a-BP.). Estos relieves, que se encuentran a partir de los 1200 msnm, se delimitan por numerosos picos y cordilleras que sobrepasan los 3000 msnm (Monte Perdido, La Munia, Bachimalas, Posests, Cotiella) y sus laderas se comportan como áreas fuente de sedimento. En la mayoría de los casos este sedimento es *till glaciar* (i.e. sedimentos heterométricos erosionados, transportados y sedimentados por los glaciares en episodios pasados), y sedimentos expuestos por diferentes procesos crionivales, heterométricos y angulosos, que son, en la mayoría de los casos, transportados a los cauces (llanura de inundación, cauces activos) por (a) procesos gravitacionales de vertiente (e.g. desprendimientos, deslizamientos, flujos de derrubios), (b) por procesos nivales (e.g. aludes) o (c) fluviales en eventos competentes (e.g. avenidas de los torrentes en episodios de deshielo, tormentas de tipo convectivo y precipitaciones de tipo advectivo asociadas a frentes).

El segundo sector del tramo, donde disminuye claramente la pendiente, se comporta como la zona receptora de sedimento. La carga sedimentaria en este tramo del río Cinca es importante, con gran extensión del área fuente de sedimento, y donde los procesos citados son todavía activos en la actualidad. En eventos competentes el sedimento se transporta aguas abajo de manera continua, determinando, de forma general, la morfología del cauce (Schumm, 1977). Se observan elevadas tasas de sedimentación en zonas donde el flujo disipa energía, creando unidades morfológicas activas como las barras fluviales, o en áreas sumidero, generando, en algunos casos, problemas socioeconómicos y ecológicos en, por ejemplo, embalses y azudes (e.g. cola embalse de Mediano). Es en este tramo donde se localiza el área de estudio (13 km de río entre Aínsa y Escalona; ver Tabla 1 y Figura 4B para más detalles).

Tabla 1. Características generales del tramo de estudio en la cuenca del Alto Cinca.

CARACTERÍSTICAS LA CUENCA DEL ALTO CINCA	
Cuenca	Cinca
Área (km²)	863 (Cinca hasta Aínsa)
Principal tributario de la Cuenca	Río Ara (649 km ²)
TRAMO DE ESTUDIO	
Longitud del tramo (km)	~13
Principales tributarios del tramo de estudio	Ríos Bellós y Barranco de San Vicente

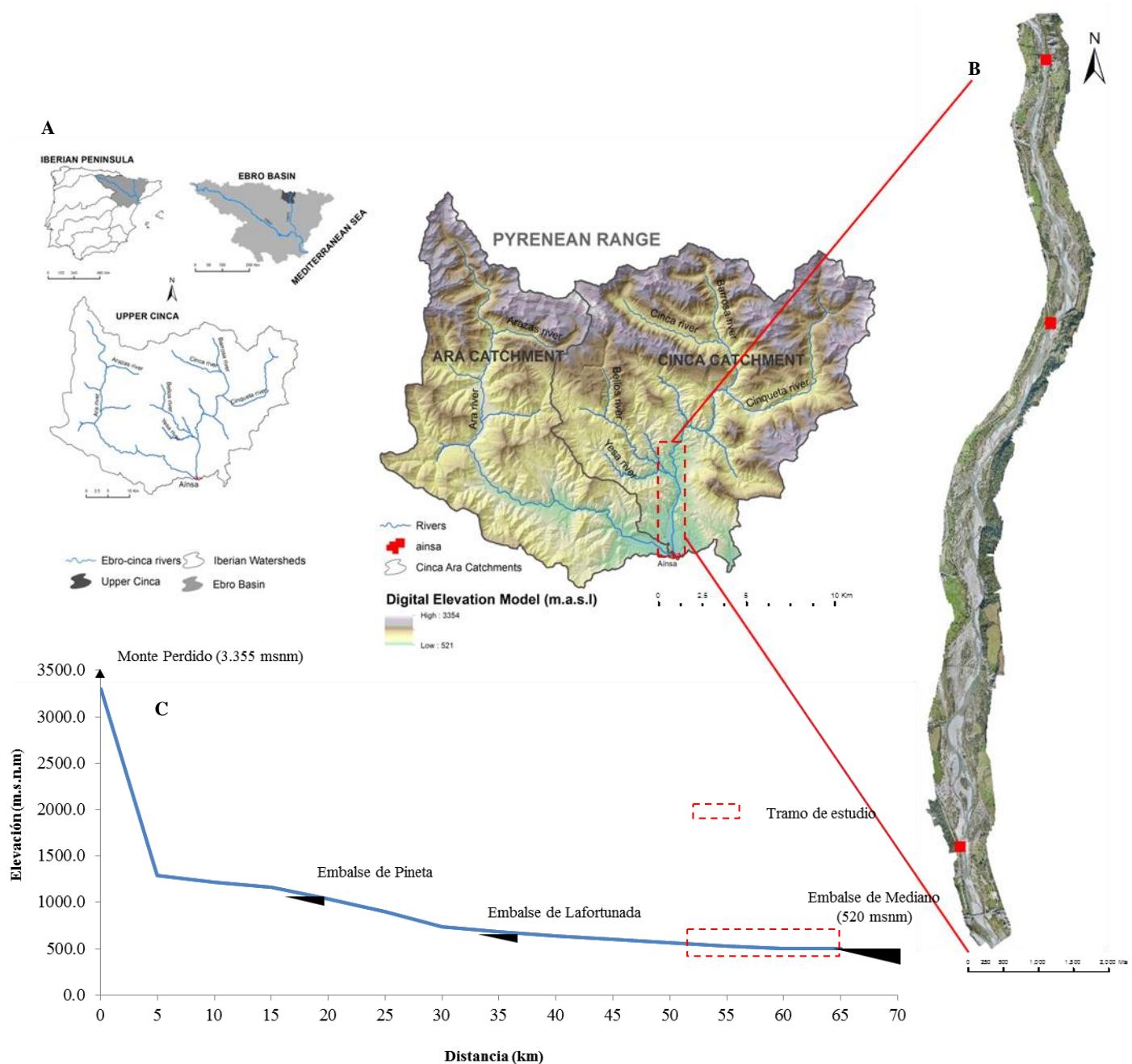


Figura 4. (A) Esquema de localización del tramo de estudio en el Alto Cinca (Pirineo Central, Huesca, España). (B) Ortofoto (15/10/2013 y resolución 0.05 m) del tramo de estudio de 13 km donde se observa la morfología típica de un río de gravas de montaña y (C) perfil longitudinal del alto Cinca desde cabecera hasta el Embalse de Mediano.

Los cambios morfológicos en el cauce en el Cinca se estiman que tienen una elevada frecuencia, con transporte de sedimentos (i.e. sedimento fino en suspensión, carga de fondo) ocasionados por episodios de crecida donde la energía es suficiente como para causar movilidad de los sedimentos. Existen estudios concretos en el tramo de estudio (Beguería et al., 2006) que afirman una pérdida sensible de producción de sedimentos y caudal en el último siglo, siendo el principal responsable, el cambio en los usos de suelo en la cuenca. Estos cambios se atribuyen a una mayor superficie forestal, en detrimento del uso agrícola (suponiendo menores tasas de escorrentía superficial), fenómenos extensibles al resto de cuencas fluviales del Pirineo (Garcia-

Ruiz & Valero-Garcés, 1998), y en general, en las principales cordilleras europeas que han experimentado un fuerte éxodo rural durante el siglo XX.

Los estudios previos, (Beguería et al., 2006) en el alto Cinca se han basado en una cartografía geomorfológica en planta a partir de fotointerpretación de fotogramas históricos (1929-1981). La disminución de caudales y producción de sedimento, han ocasionado un cambio en la morfología del tramo de estudio (ver apartado 2.2.7), pasando de ser una morfología trenzada (con dominio de migración de canales y barras en el plano horizontal del cauce) a una tendencia de estabilidad dominada por procesos de incisión. Estos cambios están también determinados por la construcción de motas laterales y las numerosas extracciones de áridos que se han llevado a cabo históricamente (Figura 16 y Figura 18).

Por tanto, tal y como se puede ver en una primera descripción del tramo de estudio, el Alto Cinca ofrece una gran oportunidad para cuantificar, a partir de modelos topográficos que aportan información 3D, la evolución morfológica del cauce (erosión-sedimentación) entre eventos competentes (i.e. que causen modificaciones en el lecho) para entender, a partir de información topográfica muy precisa, cómo funciona el sistema (trabajo) y la relación entre la entrada de energía (hidráulica), la capacidad del río (carga sedimentaria), la dinámica morfológica, y los efectos de las extracciones de áridos sobre ésta.

2.2 El Alto Cinca: análisis SIG para su caracterización

Se presenta a continuación cartografía del Alto Cinca con el objetivo de caracterizar de manera específica el tramo de estudio a partir del cálculo de distintas variables mediante herramientas SIG desarrolladas durante la realización del Máster en Tecnologías de la Información Geográfica para la Ordenación del Territorio: SIG y Teledetección .

2.2.1 Red de drenaje

A partir del MDT de 5 metros de resolución del CNIG (Centro Nacional de Información Geográfica), se han generado y procesado todas las capas ráster necesarias para obtener la red hidrográfica de la cuenca mediante la herramienta *Arc Hidro Tools* (^Arcmap 10.1). Esta cartografía mejora la cartografía espacial que ofrecen los organismos oficiales (e.g. CHE, Confederación Hidrográfica del Ebro) al haber utilizado un MDT de mayor resolución, (5 m en lugar de 25 m).

La superficie total de la cuenca (Ara y Cinca) hasta el punto de drenaje ubicado a la cola del embalse de Mediano es de 1511.63 km². Se han obtenido un total de 30 subcuenca de superficie mayor de 22 km². El área mínima para establecer la modelización de cuencas no ha seguido ningún patrón o norma establecida. Ha sido delimitado por el autor para identificar una densidad intermedia de subcuenca y ríos dentro de la cuenca.

De la misma forma, se han identificado un total de 20 tramos fluviales. En la subcuenca del Ara los principales son el Ara (con una longitud de 65.76 km), y su principal tributario, el Arazas (9.25 km). En la subcuenca del Cinca, el Cinca (65.3 km), y sus principales tributarios: Cinqueta (27.36 km) y Barrosa (9.56 km) en cabecera; y Bellos (18.36 km) y San Vicente (12.37 km) por el margen derecho, dentro del tramo de estudio en la parte baja (Figura 5). En todos los casos los perfiles longitudinales son muy similares al del Cinca, con fuertes pendientes en sus cabeceras hasta llegar a los fondos de valle y a sus tributarios.

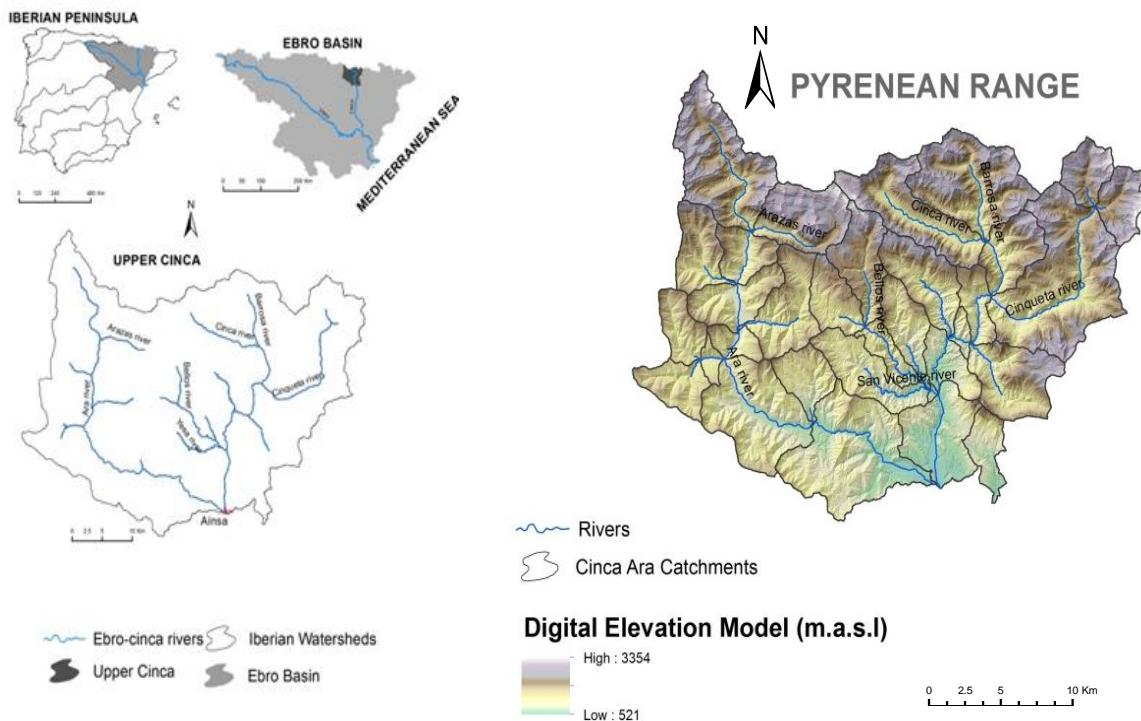


Figura 5. Red de drenaje del Alto Cinca: representación de las subcuenca y ríos principales generados a partir de un área mínima de drenaje de 22 km².

2.2.2 Análisis del relieve

La elevación máxima de toda la cuenca alta es de 3355 msnm (Monte Perdido) y la elevación mínima es de 521 msnm (cola del embalse de Mediano), lo que supone un desnivel de 2834 metros (coincidentes con el río Cinca). La elevación media es de 1937 m, y 1345 msnm es la altitud que mayor superficie abarca (Figura 6A). En la parte septentrional de la cuenca se localizan los relieve más elevados (dirección transversal), que ocupan un 23.9 % de la superficie total (por encima de los 2000 msnm). El 76.1 % de superficie restante se encuentra entre los 521 y los 2000 msnm, localizada en los fondos de valle de las cabeceras fluviales principales, y en la parte intermedia y meridional de la cuenca. Los ríos principales forman valles con dirección longitudinal (Norte-Sur) más o menos definida, mientras que los tributarios conforman valles transversales por ambas márgenes. La distribución del relieve, y por ello, la dirección de los valles y cauces está muy determinada por la tectónica y el contexto geológico estructural (Figura 9).

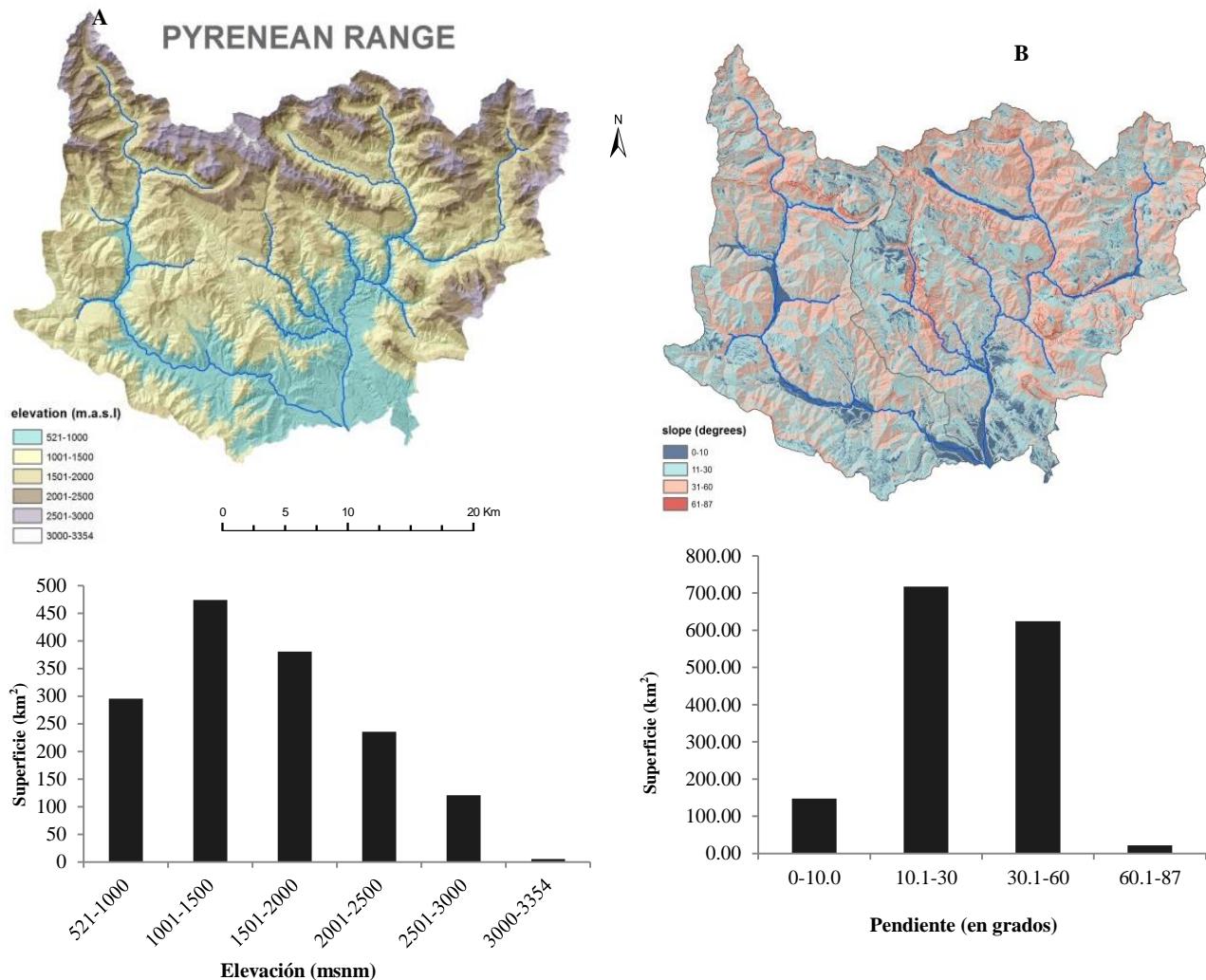


Figura 6. (A) Modelo digital de elevaciones y distribución de elevaciones por superficie y (B) Mapa de pendientes (en grados) y distribución por superficie en el Alto Cinca.

La pendiente, es un parámetro del relieve que ayuda mucho más a entender cómo puede funcionar geomorfológicamente una cuenca, siendo el factor modelador principal. La pendiente media es muy elevada (44.88°), y el 88.8 % de la superficie está entre 10.1 y 60 $^\circ$, lo cual demuestra que es una cuenca muy abrupta (carácter torrencial). Esto supone que la gran superficie está expuesta a poder transportar el sedimento que se erosiona en las áreas fuente hacia los cauces fluviales (como se observa en la foto de la figura 7). Además, las superficies con elevada pendiente están distribuidas espacialmente por toda la cuenca (no sólo en la zona septentrional, zonas más elevadas). Por ello, la morfología de los cauces principales hacia el exitorio de cuenca es muy diferente con respecto de las cabeceras. Los valles principales se ensanchan y pierden pendiente (menos capacidad erosiva), pero el aporte de sedimentos e hidráulica de los tributarios sigue siendo elevado, tendiendo hacia morfologías trenzadas, con numerosas barras y canales activos en el cauce y mayor equilibrio entre el balance erosión-sedimentación.



Figura 7. Fotografía del río Cinqueta (principal tributario del alto Cinca por el margen izquierdo). Se observa la alta conectividad de las laderas con el cauce. Significativo aporte sedimentario mediante procesos activos de ladera hacia un cauce de tipo “wandering”, afectado históricamente por actividades mineras (Fecha 16/03/2014, foto de autor).

2.2.3 Usos del suelo

Los usos del suelo de un territorio, posiblemente sea la variable que más condiciona el paisaje, comprendiendo dentro de él, los procesos naturales y el control que puede ejercer sobre las formas del relieve en su conjunto. Por ello, la superficie y la evolución histórica de los aprovechamientos y usos del suelo controlan y han controlado, en las cuencas pirenaicas, los regímenes hídricos y la tipología de valles y cauces fluviales (e.g. Gallart & Llorens 2004, Beguería et al., 2006).

La figura 8 presenta la distribución espacial de la cobertura de usos del suelo siguiendo la información facilitada por el programa estatal *Corine Land Cover* (CLC; obtenida del IGN-CNIG) del año 2006, a una escala de 1:100.000. Las coberturas que se representan cartográficamente corresponden al tercer orden jerárquico del CLC, y la leyenda sigue la gama de colores oficiales RGB del CLC. A partir de la información espacial de usos del suelo, se ha hecho un breve análisis que compara la ocupación espacial por coberturas en la cuenca (suma de 9 tipos de cobertura). La vegetación ocupa en su conjunto un 84.32 %, lo que corresponde a 1274.59 km². Las zonas de roquedo, glaciares y sistemas fluviales un 13.09 % (197.80 km²). Las zonas agrícolas un 2.19 % (33.09 km²). Las zonas mixtas un 0.32 % (4.93 km²) y el tejido urbano un 0.15 % (0.08 km²).

Estos resultados muestran como la cuenca en su conjunto está muy forestada, dominio muy predominante sobre el resto de coberturas. Se distribuye por la mayor parte de la cuenca, y su límite superior del bosque (*timberline*) puede alcanzar los 2500 msnm. En la actualidad, la vegetación sigue ganando superficie en detrimento de los usos agrarios y ganaderos (tan solo un 2.19 %), siendo una variable que directamente, ha implicado cambios históricos en el último medio siglo en la morfología del tramo de estudio en el río Cinca. Las zonas donde predominan el roquedo y las formaciones geomorfológicas (glaciares, de ladera, etc.) son la segunda cobertura con mayor superficie espacial, importante de nuevo, para destacar la presencia de áreas fuentes de sedimento para aportar a los cauces en una cuenca altamente montañosa, con fuertes pendientes, como se ha podido ver en el punto anterior.

La presión demográfica en toda la cuenca es mínima, con pocos enclaves de población, muy repartidos en pequeños núcleos por la mayoría de los valles (1.15 % de la superficie). Los núcleos de población más importantes son Boltaña y Aínsa, localizados en la parte más

meridional. La población total de la comarca del Sobrarbe es de 7790 habitantes (2011), lo que supone una densidad de 3.51 hab/km².

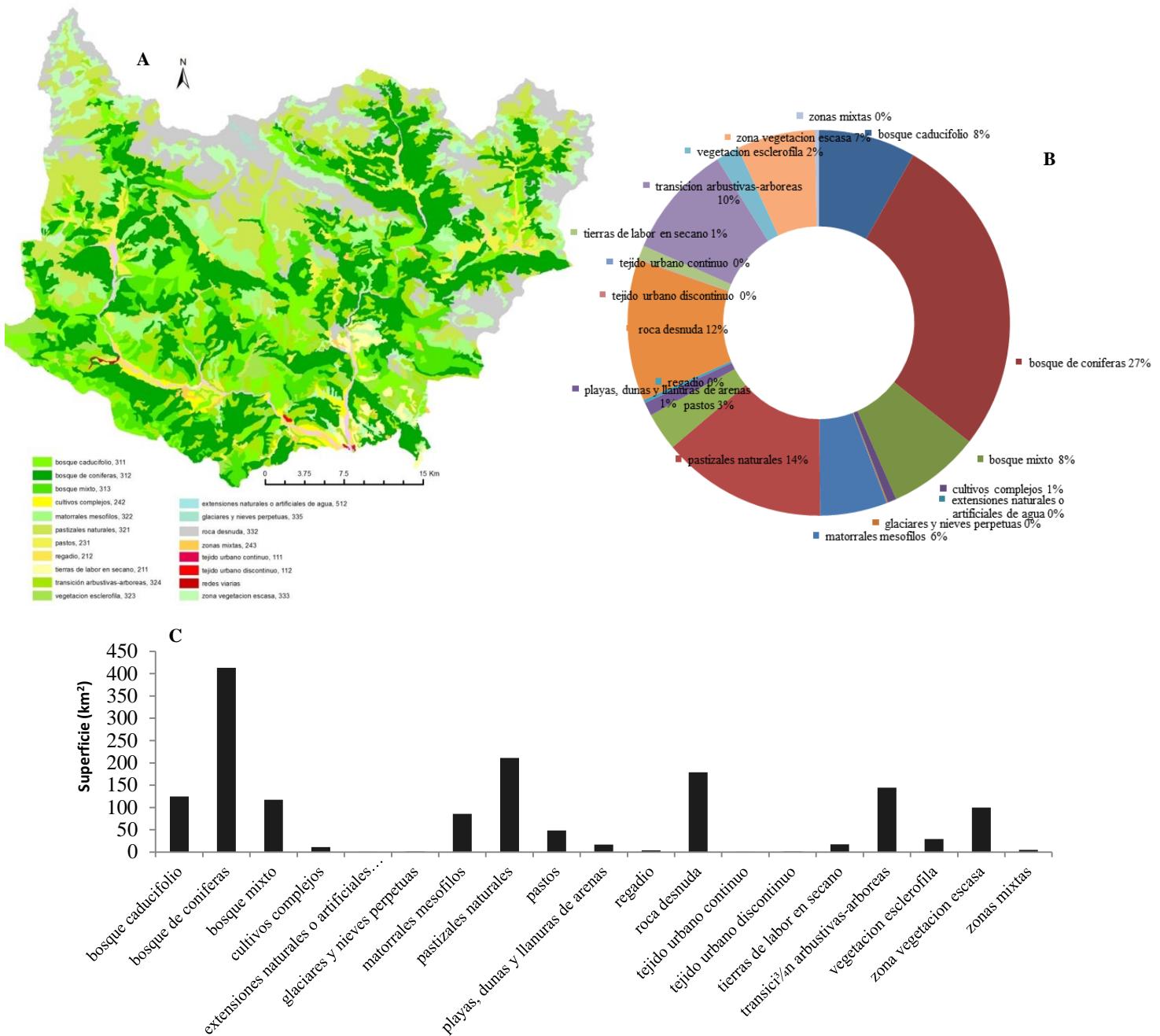


Figura 8. (A) Catorgrafía de los usos del suelo en el Alto Cinca. (B) Distribución porcentual.

(C) Superficie de los usos de suelo. Fuente datos: *Corine Land Cover*, 2006. Elaboración propia.

2.2.4 Geología

Para ofrecer una información litológica simplificada, se ha llevado una reclasificación y agrupación del campo de litología (Fuente: CINTA-SITAR). El resultado es una cartografía geológico-litológica (litología y fallas) que ayuda a contextualizar la cuenca (Figura 9).

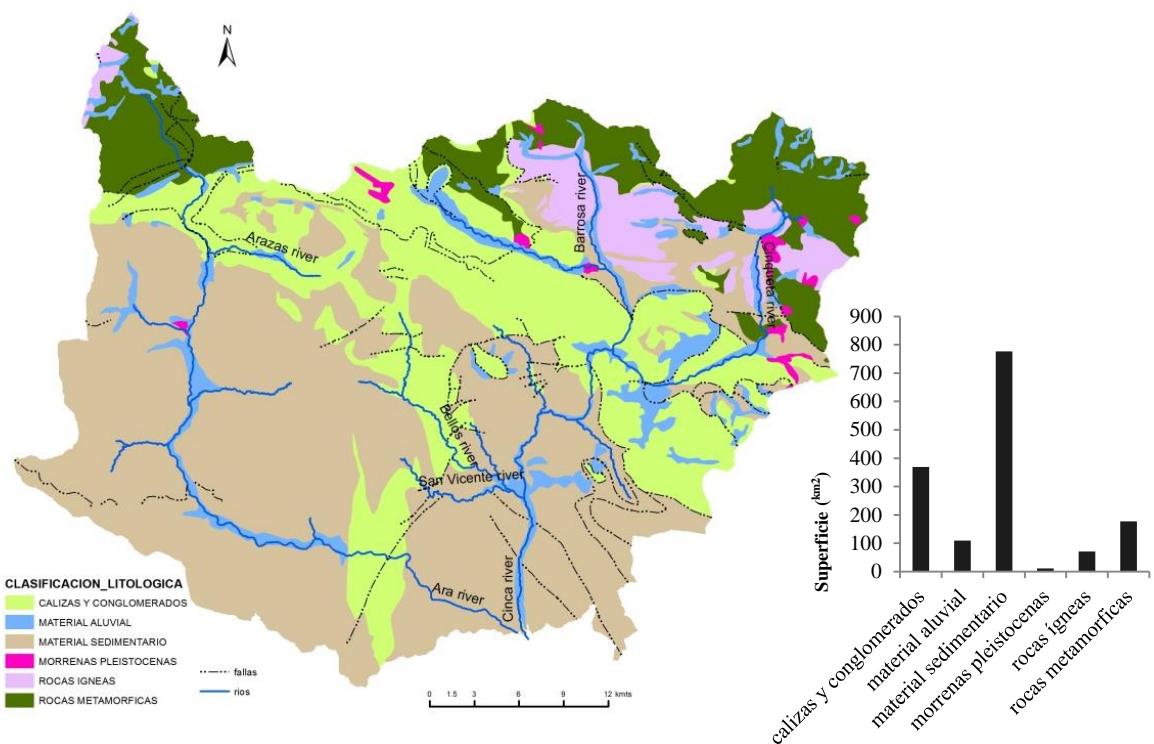


Figura 9. Cartografía y superficie de la litología del Alto Cinca y fallas. Fuente datos: Centro de información territorial de Aragón (CINTA). Elaboración propia.

La variedad litológica que podemos encontrar en el área de estudio, explica la complejidad geomorfológica típica de la parte sur de la cordillera pirenaica. De Norte a Sur, se realiza una división geomorfológica clásica en la que se distinguen: (a) el Pirineo axial, es la parte más septentrional, conformado por los relieves más antiguos (Paleozoico, 500 M.A BP.), encontrando rocas metamórficas (pizarras, esquistos, mármoles) e ígneas (granitos, granodioritas) ocupando el 16.41 % de la superficie. (b) Las sierras interiores, conformadas por los macizos calcáreos más elevados de Europa (Perdido-Cotiella), con presencia de calizas y conglomerados paleocenos (24.36 %), con una fuerte reactivación en la orogenia alpina, y afectados en gran medida por los estadios del glaciarismo cuaternario más activo (morrenas pleistocenas, 0.72 %), al igual que el Pirineo axial. (c) La depresión media, ocupa el centro y la parte inferior de la cuenca (más de la mitad de superficie; 51.28%), conformado por los materiales sedimentarios más blandos del eoceno (e.g. margas, areniscas). Estos materiales más blandos, aportan gran cantidad de sedimento fino a los cauces secundarios, que tributan al Ara y al Cinca en las zonas más bajas, donde se abren los valles (tramo específico de estudio). El 7.24 % restante corresponde a materiales aluviales (e.g. llanuras aluviales, ibones de montaña pleistocenos creados por sobreexcavación glaciar).

El marco tectónico general también diferencia grandes estructuras: (a) por encima del Paleozoico, la sucesión de rocas del Mesozoico y del Paleógeno que están desplazadas formando varios cabalgamientos, y (b) la vertiente centro-meridional de los Pirineos caracterizada por una alineación estructural dominada por las direcciones ESE-WNW; aunque en determinadas zonas se encuentran estructuras transversales que se orientan aproximadamente N-S.

2.2.5 Clima

Para contextualizar climáticamente (precipitación y temperatura) la cuenca, se han elegido dos estaciones meteorológicas automáticas incluidas en la red del SAIH-Ebro de la Confederación Hidrográfica del Ebro (CHE). Su distribución espacial y diferente elevación (Lafortunada, 690 msnm; El Cebollar, 1930 msnm) pueden explicar la moderada variabilidad climática en esta área de montaña (Figura 10).

El promedio anual de precipitación acumulada es de 924 mm en Lafortunada y de 731 mm en El Cebollar (2000-2012). Cabe apuntar que la precipitación en este caso es menor en una estación que se encuentra a casi 2000 msnm, siendo algo anómalo con respecto a una estación que se encuentra a menor altitud. En este caso la diferencia se puede atribuir a que está en una situación de abrigo orográfico, a sotavento de los vientos de componente oeste que mayor humedad aportan.

La distribución anual de las precipitaciones es un parámetro más interesante para caracterizar hidrográficamente la cuenca (ver apartado 2.2.6). Esta distribución tienen un carácter homogéneo en las dos estaciones de referencia, con máximo equinocciales (otoño y primavera respectivamente) y mínimos en verano e invierno (éste el más acentuado). Es por ello, que los caudales máximos anuales se dan en los meses de otoño con un carácter pluvial (asociado a fuertes procesos convectivos, en ocasiones DANAs o gotas frías) y en los meses más avanzados de la primavera, de carácter nivo-pluvial o pluvio-nival dependiendo de si es la fusión nival o las precipitaciones asociadas a frentes lo que más agua aportan a los cauces.

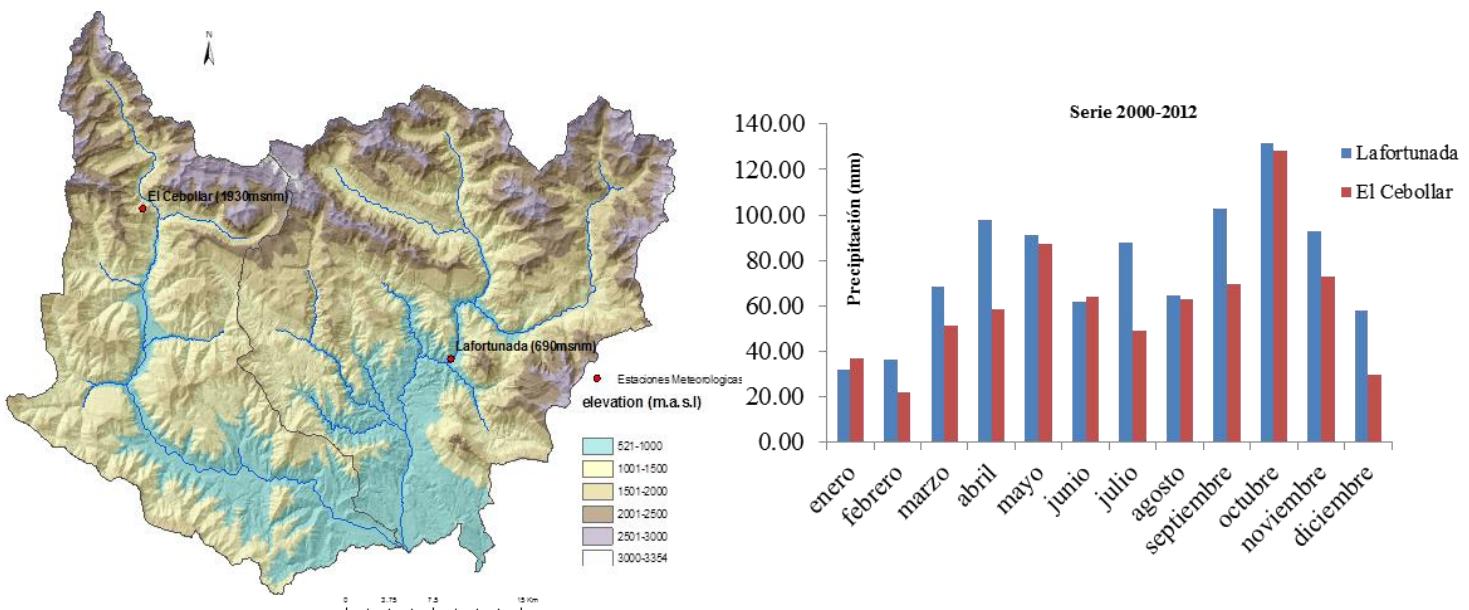


Figura 10. Localización y pluviometría (precipitaciones acumuladas mensuales serie 2000-2012) de dos estaciones meteorológicas del alto Cinca (Datos climáticos: SAIH; elaboración propia).

La temperatura media anual (serie 2003-2013) es de 11.95 °C en Lafortunada y 6.03 °C en el Cebollar (SAIH-Ebro, CHE). Se podrían interpolar estos valores térmicos por intervalos altitudinales. Los promedios térmicos anuales están entre los 12 y 6 °C en alturas menores a los

2000 msnm, y son inferiores a los 6 °C por encima de esta altitud, con promedios próximos a los 0 °C en las elevaciones que superan los 3000 msnm (*Atlas Climático de Aragón, 2007*).

2.2.6 Hidrología

Para contextualizar hidrológicamente el tramo de estudio se ha seleccionado la estación de aforos EA-51 (Escalona, Alto Cinca, Huesca) localizada dentro de los 13 km del tramo (Tabla 2, Figura 11).

Tabla 2. Características de la estación de aforos EA-51 de la que se han extraído los datos de caudal para el contexto hidrológico del tramo de estudio. Fuente: SAIH-CHE.

Nombre	9051 Escalona (Río Cinca)
Localización	Escalona-Huesca
Código SAIH	EA051
Altura	530msnm
Sup. Cuenca	836km ²
Coordenadas (ETRS 89-HUSO 30 N)	758948/4707662
Tipo de estación	Cauce natural
Anchura (m)	68
Escala	Si
Serie temporal histórica	1959-1993
Serie temporal contemporánea	2003-2013

La estación de aforos se localiza aguas abajo de los principales tributarios del alto Cinca, aportando datos de caudal representativos para caracterizar el Cinca en el tramo de estudio, hasta la confluencia con el río Ara en Aínsa. Existen otros pequeños tributarios a lo largo del tramo, con aportaciones modestas, aunque sí significativamente importantes en eventos puntuales en cuanto al aporte de sedimentos en suspensión.

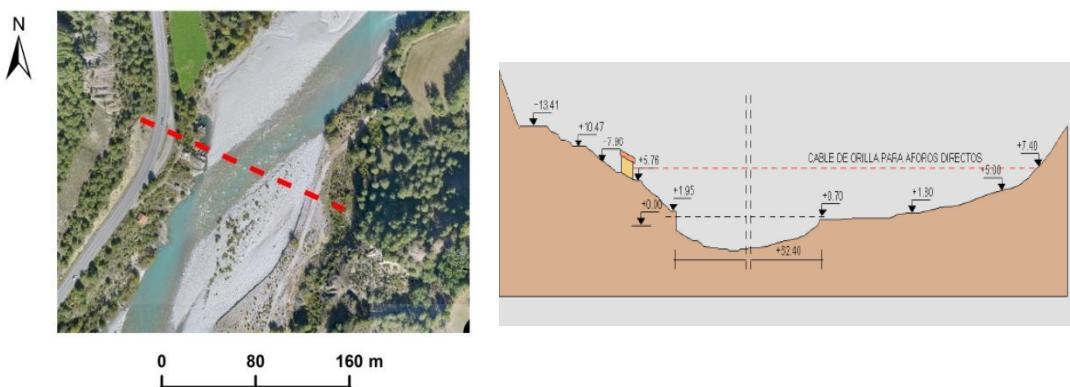


Figura 11. Localización de la estación de aforos EA-51 en la ortofoto del tramo de estudio (izquierda, sección en línea roja). Esquema en planta de la sección transversal de la estación de aforos (derecha). Fuente: SAIH-CHE.

El régimen hídrico del alto Cinca se encuentra altamente regulado por una red de minicentrales distribuidas en la cabeceras de los principales tributarios (ver Figura 12).. Muchas de estas centrales generan hidrópicos diarios de diversa magnitud, en función de sus capacidades y de la demanda de electricidad. La frecuencia temporal y magnitud de los hidrópicos es muy heterogénea (Figura 13), y no responde a patrones regulares diarios. En concreto, dentro del tramo de estudio, la central de Laspuña (Acciona) tiene una capacidad máxima de $25 \text{ m}^3/\text{s}$.

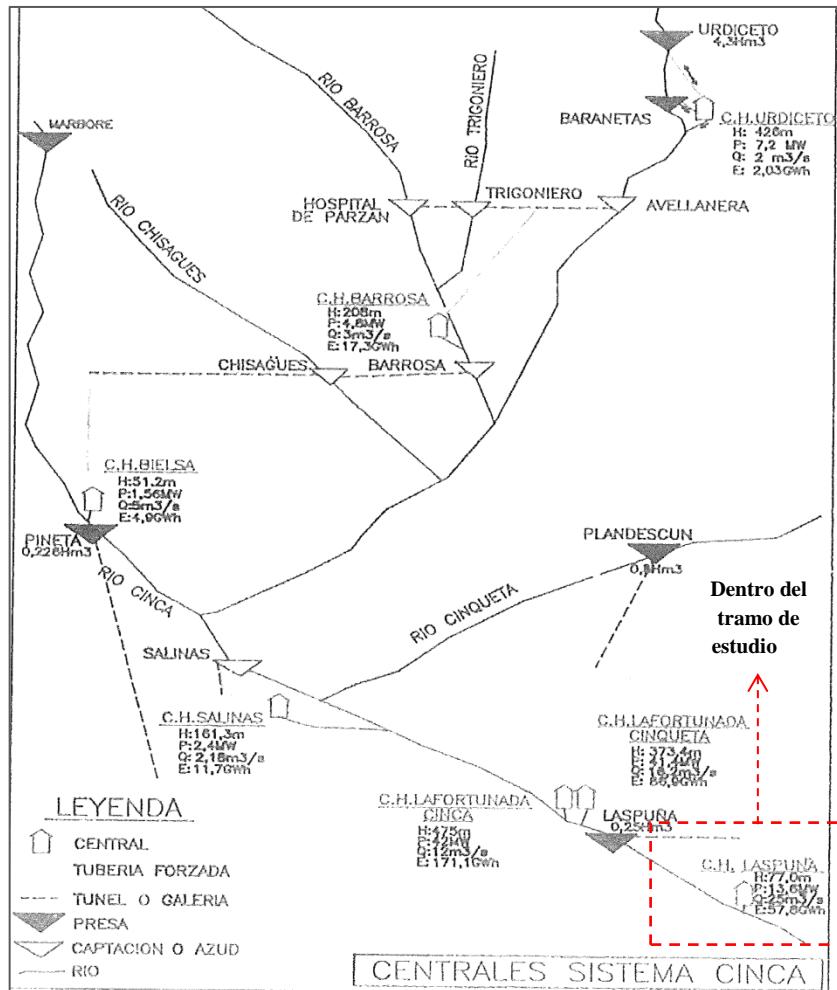


Figura 12. Esquema de la red de Centrales Hidroeléctricas, Presas, Azudes y Galerías de conexión en el Alto Cinca. La CH de Laspuña tiene la salida dentro del tramo de estudio (recuadro rojo) y una capacidad máxima de desagüe de $25 \text{ m}^3/\text{s}$. Fuente: Acciona.

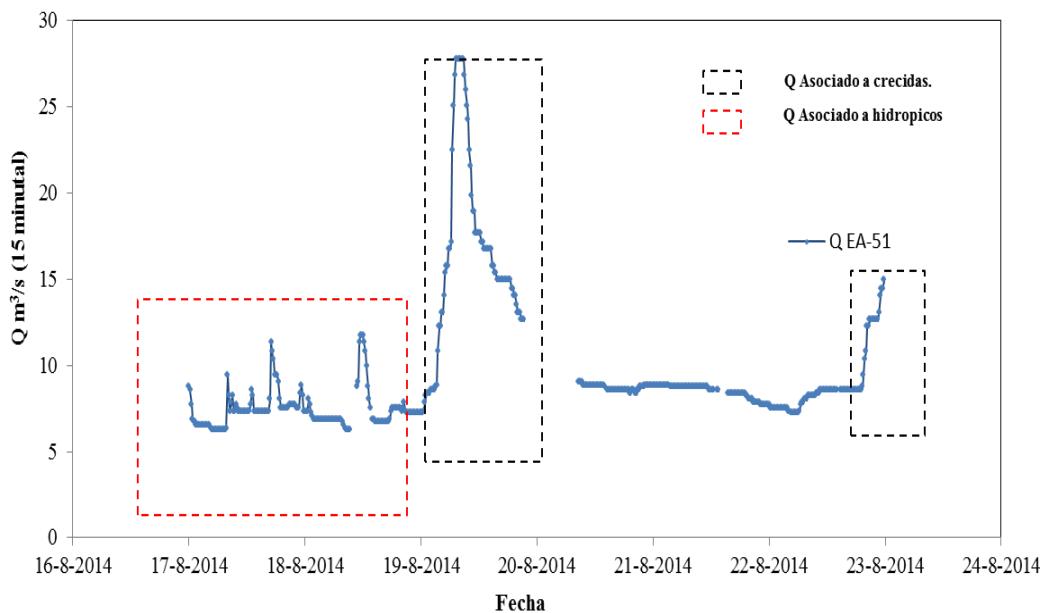


Figura 13. Hidrograma de caudales quincenuales de la EA-051 para una serie temporal de una semana. Se muestra un ejemplo que diferencia la estructura y magnitudes de una respuesta que genera la Central Hidroeléctrica de Laspuña (recuadro rojo), en comparación con dos crecidas de pequeña magnitud (recuadro negro).

La aportación media anual oscila entre los 1600 y 600 hm^3 (Figura 14). Por su parte, los caudales medios mensuales muestran cierta estacionalidad determinada por su régimen pluvio-nival. La aportación máxima mensual se sitúa en la primavera y otoño (Figura 14B); períodos caracterizados por el deshielo y episodios de precipitación de elevada intensidad, respectivamente.

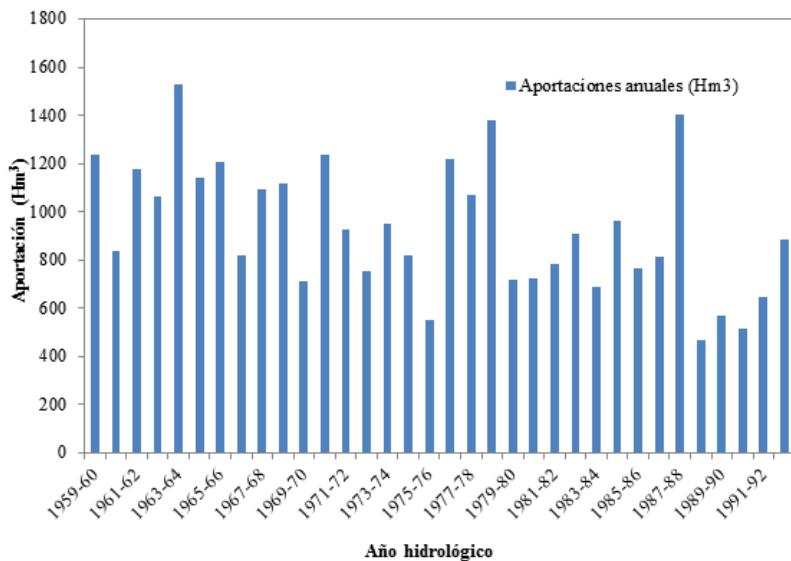


Figura 14. Aportaciones anuales (Hm^3) para la serie 1959-1993 (EA-051).

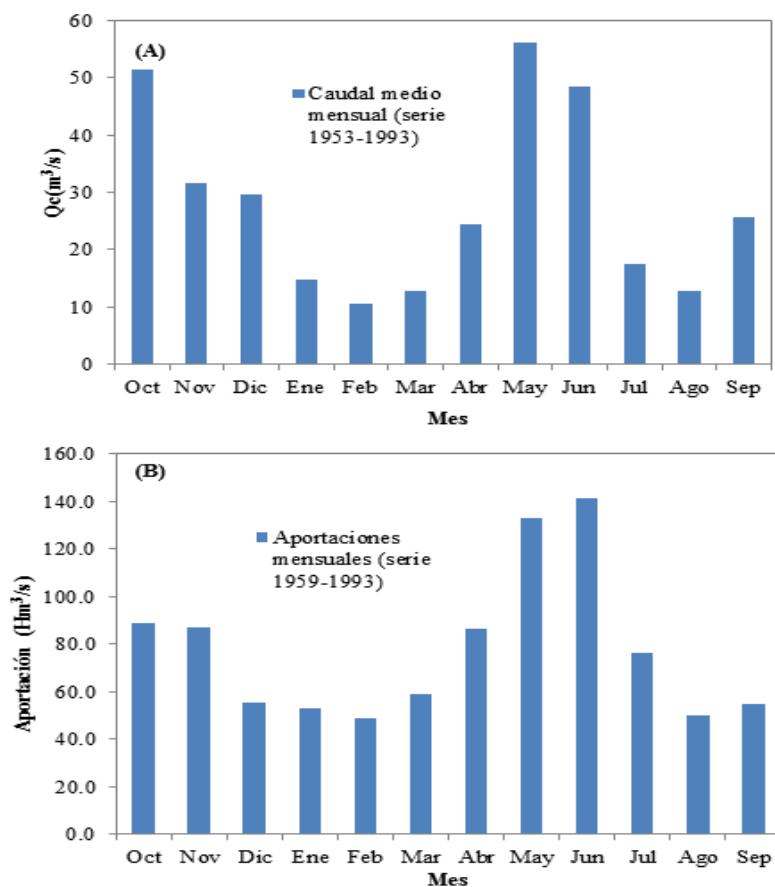


Figura 15. (A) Promedio mensual del Caudal medio mensual y (B) promedio mensual de aportaciones para la serie 1959-1993 (EA-051).

Por último, la tabla 3 muestra los resultados de un análisis de períodos de retorno muy básico a partir de distintas funciones de probabilidad aplicadas al caudal medio máximo anual (Q_c).

Tabla 3. Relación de Q /Período de retorno calculado aplicando 3 métodos diferentes y la media. Los cálculos se realizan para la serie (1959-1993) de la EA-051. Fuente: CEDEX.

Período de retorno (años)	Q (m^3/s)			
	Gumbel	LPIII	SQRT	Media
2	276	243	232	250
5	492	408	404	434
10	635	555	538	576
25	815	795	730	780
50	949	1019	888	952
100	1083	1289	1058	1143
200	1215	1614	1240	1356
500	1390	2144	1501	1678
1000	1522	2648	1712	1961

2.2.7 Dinámica morfológica e impactos

El tramo alto del río Cinca se caracteriza por ser un sistema fluvial con elevadas tasas de cambio morfológicos, tanto históricas como actuales (e.g. Rubio, 1995). La elevada frecuencia de eventos de crecidas o los impactos antrópicos han modificado y modifican los patrones morfológicos del cauce.

2.2.7.1 Morfodinámica

El tramo alto del Cinca se ha caracterizado históricamente por una morfología de tipo trenzado o braided (Figura 16, fotograma 1927), con formación de numerosos canales debido a las elevadas tasas anuales de cambio, asociadas a frecuentes eventos de crecidas de alto aporte sedimentario. Esta tipología es frecuente en ríos de montaña, con pendientes moderadas, gran superficie de drenaje y de elevado aporte sedimentario. Esta morfología también puede ser observada en otros ríos de similares características de la cordillera pirenaica (e.g. tramos altos de los ríos Ara y Aragón).

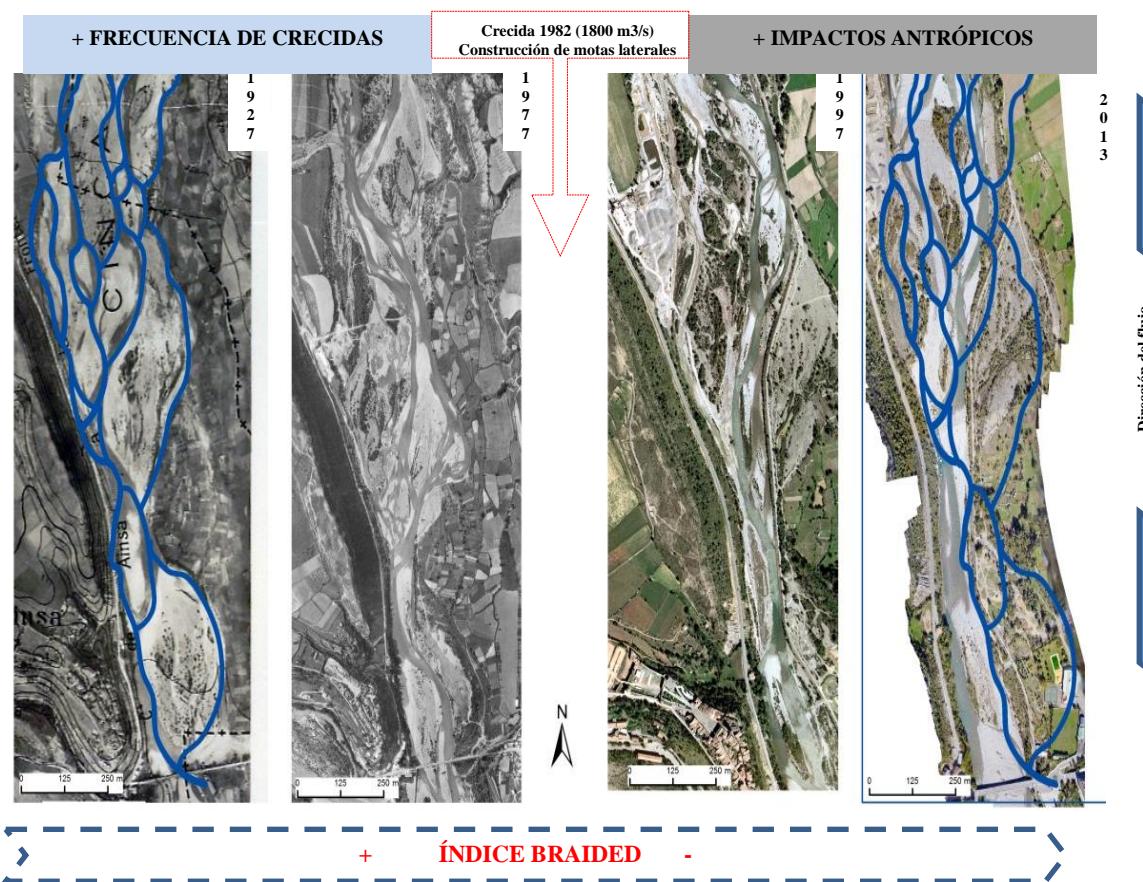


Figura 16. Fotogramas y ortofotos (1927-1977-1997-2013) de unos de los tramos del área de estudio próximos a Aínsa. Se observan marcados cambios morfológicos en este tramo del Cinca, indicando el dinamismo de un río trenzado por distintas perturbaciones de diferente carácter, natural (crecidas) y antrópico (extracciones de áridos y escolleras). El término *braiding index* se refiere al índice de multiplicidad de canales que se puede expresar como el cociente entre la longitud de los canales y la longitud del cauce principal. A mayor el índice mayor la complejidad de canales a lo largo de la llanura de inundación.

De manera general, la evolución morfológica del cauce en el siglo pasado se puede dividir en dos fases muy marcadas, delimitadas por un punto de inflexión en la década de los 70-80. En la primera fase, hasta la década de los 70 del siglo XX (ver fotogramas 1927 y 1977 en la Figura 16) el cauce tiene un índice elevado de multiplicidad de canales (*braiding index*), caracterizado por muchos canales activos a lo ancho del cauce y numerosas barras activas (e.g. barras laterales, centrales, transversales y diagonales) poco vegetadas, asociadas a un marcado dinamismo sedimentario. La vegetación de ribera es de poca densidad y se concentra en las márgenes de la llanura de inundación, junto con campos de cultivo en el margen izquierdo. En conclusión, patrón morfológico tipo donde domina una alta frecuencia de eventos de competencia que provocan la movilidad del cauce. La segunda fase, desde los años 80 del siglo XX hasta la actualidad, es un periodo en el que el patrón morfológico está claramente modificado o condicionado por el hombre con una marcada tendencia hacia la estabilidad. Esto supone una disminución de la migración de los canales y barras. La densidad de canales es ahora mucho menor, y se acentúa el gradiente erosivo vertical (i.e. incisión), el sistema fluvial obliga a readjustar los desequilibrios de pendiente modificando el perfil longitudinal hacia un patrón de tipo *wandering* con secuencias de rápidos y pozas (Figura 16). La densidad de barras sedimentarias desnudas (sin vegetación) disminuye drásticamente, del 69.9 % en 1929 al 29.6 % en 1981 (Beguería et al., 2006). Estos cambios morfológicos vienen determinados por dos componentes principales: (a) la disminución en la frecuencia de crecidas, por un menor aporte hídrico en todas las cuencas pirenaicas, en estrecha relación con las modificaciones en los usos de suelo y con la dinámica demográfica rural (e.g. García Ruíz et al., 1998; Beguería et al., 2006;), y quizás mayoritariamente, (b) por el aumento de los impactos antrópicos en el cauce (e.g. construcción de motas en márgenes, extracciones de áridos, etc.). En este último caso, tal y como muestra la figura 16, posteriori a la crecida de noviembre de 1982 ($1800 \text{ m}^3/\text{s}$), se construyó una mota en ambas márgenes del cauce para proteger zonas urbanas y cultivos próximos, estrechando casi a la mitad el cauce activo cercano a la zona de Aínsa, con un efecto directo sobre la morfología a corto y largo plazo (Rubio, 1995). En el siguiente apartado se describen de manera más detallada los principales impactos antrópicos en el tramo de estudio.



Figura 17. Fotografía de un tramo del alto Cinca en las proximidades de Labuerda (foto D. Vericat, verano de 2014). En la fotografía se observa el alto relieve de las barras y la erosión lateral en estas (i.e. incisión del cauce), y una secuencia de rápido-pozas característica del tramo.

2.2.7.2 *Impactos antrópicos*

Aunque son numerosos los impactos antrópicos a escala de cuenca tal y como se ha descrito anteriormente, a escala de tramo, con un efecto puntual pero con una propagación de este aguas arriba y abajo, las extracciones de áridos, se pueden considerar como el principal impacto sobre la dinámica morfo-sedimentaria del tramo del Alto Cinca (ver Figura 18). En la actualidad, se convierten en el principal fenómeno modificador de la morfología y topografía del cauce. Actualmente no se realizan extracciones de áridos sin estar relacionadas, o tener implicación directa con actuaciones de mejora del cauce promovidas por la administración pública (e.g. protección inundaciones, mejora infraestructuras).

Un ejemplo actual (Figura 18) de actuaciones antrópicas en el tramo de estudio, es la que se llevó a cabo durante un período aproximado de 5 meses en la localidad de Escalona (Huesca, España). Esta tipología de actuaciones se basa en la modificación del curso de los canales, con el objetivo de modificar las zonas de erosión-sedimentación en caso de que existan áreas potencialmente vulnerables (e.g. en el caso de este ejemplo la zona de jardines-ocio localizado en el margen derecho). Tal y como se observa en la figura, el impacto morfológico es significativo. En la mayoría de los casos, las actuaciones se basan en un estrechamiento de la anchura del canal, favoreciendo procesos de incisión vertical. A posteriori, en eventos de crecida el cauce reequilibra los puntos de ruptura de pendiente generando una migración de éste aguas arriba (incisión) y sedimentación aguas abajo (Kondolf, 1994; Batalla, 2003). En todo caso, estas actuaciones, normalmente, también suponen una extracción de material sedimentario del lecho, sin reposición o redistribución.

La aplicación de SfM para el desarrollo de modelos topográficos antes de estas actuaciones puede ser de gran interés para la administración. Además de los modelos, el flujo de trabajo que se presenta aquí permite la adquisición de ortofotos de elevada resolución. Estos modelos pueden ser determinantes para la modelización hidráulica de posibles diseños (proyectos) para una correcta selección en función de las particularidades de cada caso. Además, la rapidez en la adquisición de datos puede favorecer la obtención de modelos posteriores para la cuantificación de los volúmenes extraídos y para el control del re-ajuste del cauce a la perturbación (incisión-sedimentación). Todo ello conlleva una mejor planificación y gestión de los sistemas fluviales.

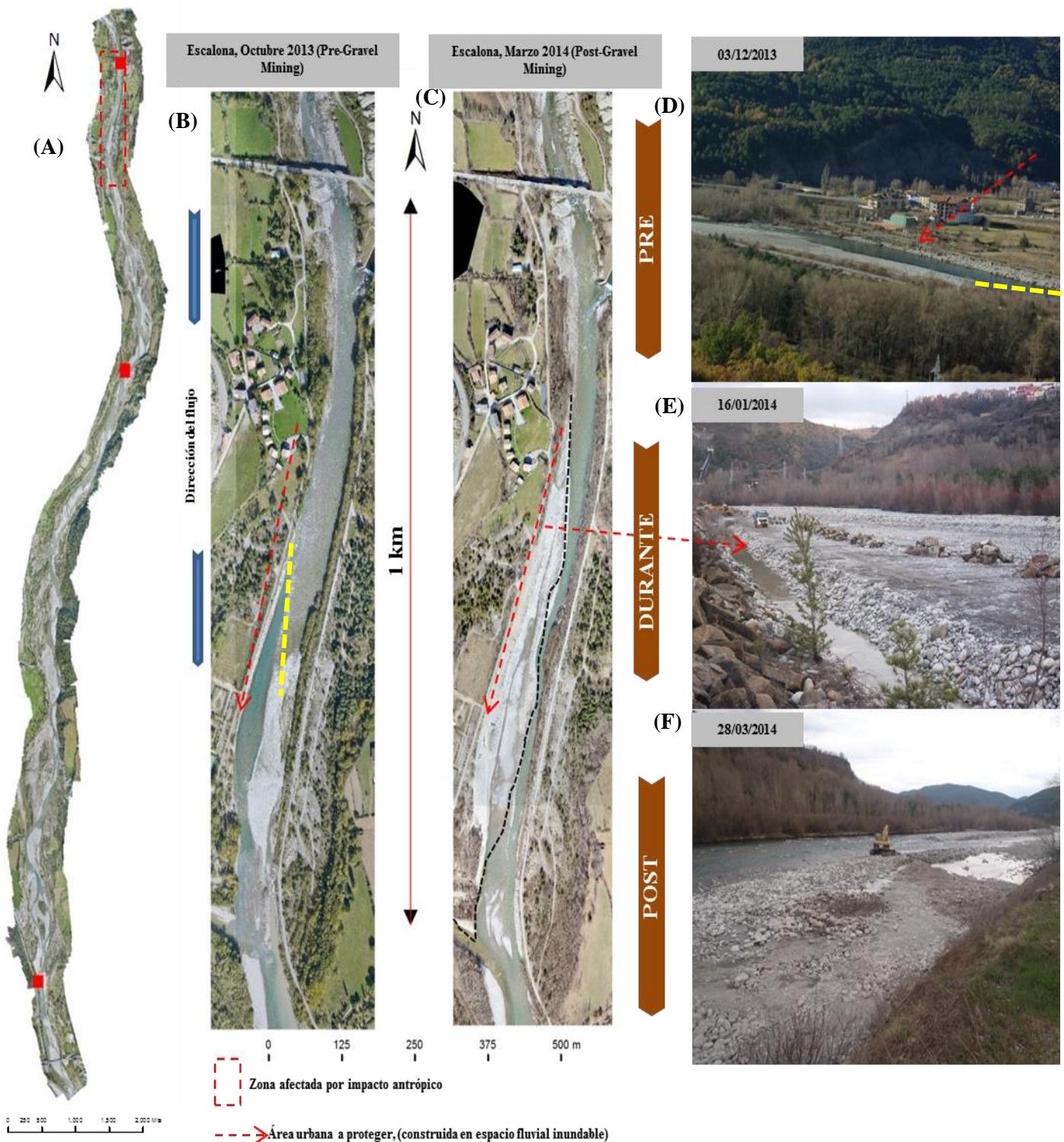


Figura 18. (A, B, C) Ortofotos de 0.1m de resolución generadas a partir de técnicas de fotogrametría digital automatizada. (D, E, F) Fotografías de tomadas en campo durante la actuación. Se observa las modificaciones por fases (morfología y topografía) en la zona afectada entre Diciembre de 2013 y Marzo de 2014 (Escalona, Alto Cinca).

3. METODOLOGÍA Y DISEÑO EXPERIMENTAL

En este apartado se presenta el flujo de trabajo desarrollado para la adquisición de información topográfica a partir de técnicas de fotogrametría digital automatizada. Este primero apartado está directamente asociado al objetivo 1 del trabajo. Posteriormente, se describe la metodología asociada al análisis de errores en la información topográfica obtenida (Objetivo 2) y la validación (Objetivo 3) de los modelos mediante la comparación de éstos con los datos obtenidos con técnicas de mayor precisión (i.e. Láser Escáner Terrestre).

3.1 Obtención de datos topográficos a escala de tramo

La metodología para obtener topografía a partir de SfM dispone de fases de (a) aplicación general (e.g. post-procesado) y (b) fases específicas que están relacionadas con la tipología de superficie a caracterizar y la escala de análisis (e.g. número de puntos de control y tamaño de éstos). A continuación se presenta el diseño metodológico desarrollado, aplicado y validado (i.e. flujo de trabajo) para obtener los resultados relacionados con el objetivo 1 del presente trabajo.

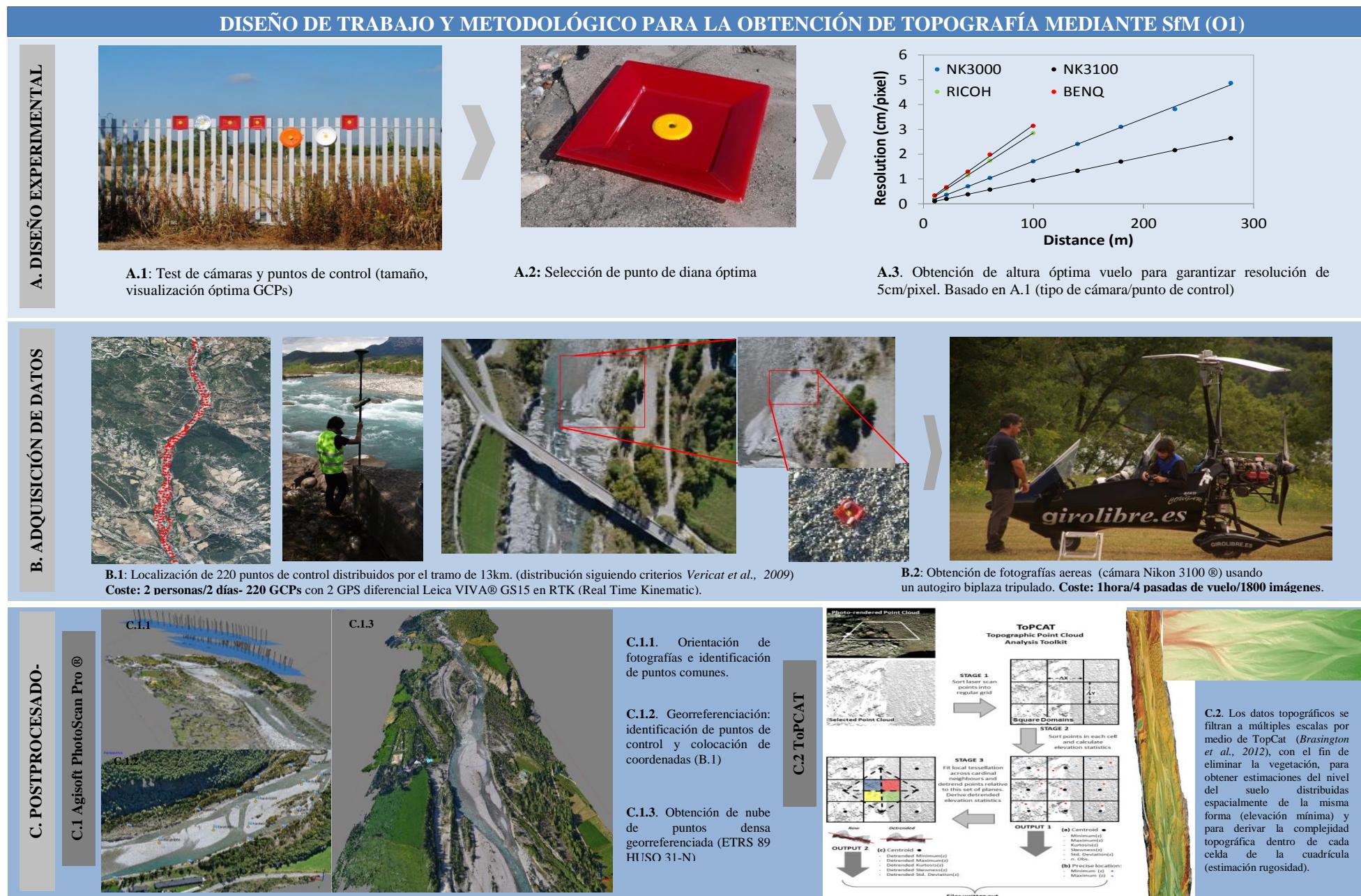
3.1.1 Diseño experimental y adquisición de datos

El diseño experimental (Figura 19A) es quizás, el apartado de mayor importancia para una correcta aplicación de la técnica en función del objeto de estudio. Para un correcto diseño experimental es necesario una serie de visitas de campo para reconocer algunas características de las superficies que queremos estudiar (variabilidad topográfica, acceso para el establecimiento puntos de control, posibilidades para la toma de fotografías, etc.). Una vez obtenidas estas observaciones y en base al objeto de estudio y la resolución mínima necesaria para caracterizar la unidad a analizar, el usuario debe resolver una serie de preguntas fundamentales para la finalización del diseño experimental:

- (1) A que distancia máxima del objeto a representar se pueden tomar las fotografías? Esta pregunta requiere tener claro dos aspectos fundamentales: (i) cuál es la resolución mínima necesaria para nuestro estudio? (ii) Cuál es el medio que se utilizará para la toma de fotos?
- (2) Es la óptica de la cámara que utilizamos un elemento determinante de la pregunta anterior? De las cámaras que disponemos, cuál es la que proporciona mayores resoluciones a mayores distancias entre la posición de la toma de fotos y las unidades a analizar?
- (3) Relacionado con (1) y (2), cuál es la tipología de puntos de control (o dianas, de aquí en adelante GCP) adecuada, que facilite su posicionamiento en campo y su posterior localización en las fotografías para el post-proceso? debemos utilizar en función de criterios de visualización/coste económico/coste temporal en la colocación de la red de control sobre el tramo de estudio.

En el caso específico de este estudio, se consideró que era necesario obtener fotografías a una resolución mínima de 5 cm/pixel. Se determinó esta resolución en base a la variabilidad granulométrica del cauce del tramo de estudio. Aunque se disponía de UAV no tripulado, se decidió tomar las fotografías mediante un autogiro tripulado para el aumento de la escala espacial (y gracias a la disponibilidad en el área de estudio a un coste relativamente bajo), hecho que evidencia la importancia de las visitas de campo anteriores al inicio del diseño experimental. Posteriormente, se realizaron una serie de pruebas de laboratorio para la finalización del diseño experimental. En cuanto a las cámaras fotográficas disponibles, se

testearon 2 de tipo compactas (i.e. RICOH ®, BENQ®) y 2 cámaras tipo réflex (i.e. NIKON3000 ® y NIKON 3100 ®). La finalidad del test es obtener un modelo que relacione la distancia y el tamaño píxel para cada una de las 4 cámaras (Figura 19, A.3). Para este estudio se hicieron una serie medidas sobre los puntos de control (dianas) ubicados de manera vertical (Figura 19, A.1). Se estacionó una Estación Total Topográfica Leica TCRP 1205 de reflexión directa en un total de 9 ocasiones a lo largo de un vector longitudinal de 300 m. Al mismo momento, en cada uno de los 9 puntos de estacionamiento, se tomaron las fotografías con las 4 cámaras. Esta información permitió obtener la resolución de cada fotografía obtenida en cada una de las 9 posiciones de toma/estacionamiento. Tal y como se observa en la figura 19, A.3, la cámara réflex NIKON3100 ® posee el modelo más óptimo, y fue por tanto, la elegida para la toma de fotos. De manera específica, la altura de vuelo necesaria para garantizar una resolución mayor a los 5cm/pixel para esta cámara es de 275 metros. Por último, se testearon un total de 4 tipos de puntos de control (Figura 19, A.1) según criterios de forma, tamaño y color. Los resultados más óptimos fueron los obtenidos para la tipología de GCP que se muestra en A.2 (Figura 19).



La adquisición de datos (Figura 19 B) en campo supone la segunda fase en el flujo de trabajo que hemos desarrollado. El trabajo de campo se divide en dos componentes principales: (a) la disposición de la red de puntos de control a lo largo del tramo de estudio (elemento determinante para el objetivo 2 de este estudio), y (b) la obtención de fotografías aéreas a partir de las cuales se obtendrá la nube de puntos topográfica mediante un autogiro tripulado (Figura 19, B.1 y B.2)

Para un correcto desarrollo del objetivo 2, ha sido necesaria la utilización de una elevada densidad de puntos de control. La distribución espacial de los GCPs se caracteriza por un patrón equidistante de secciones transversales al cauce abarcando la longitud del tramo (siguiendo criterios de distribución de Vericat et al., 2009). Se ubicaron un total de 220 puntos de control usando 2 dGPS Leica Viva GS15® RTK (del inglés; Real Time Kinematic) con corrección vía GPRS utilizando las estaciones de referencia del SITAR. La calidad 3D (x,y,z) de las coordenadas de los GCPs se ubica entre 1 y 5 cm. Para la localización y toma de las coordenadas de los GCPs son necesarias 2 personas durante 2 días. El coste económico depende de la disposición del instrumental topográfico. También se debe tener en cuenta la viabilidad de establecer una red de puntos de control según la complejidad del relieve de la zona (accesibilidad). Por último, la obtención de fotografías aéreas (B2) tiene un coste temporal/económico mucho menor que el establecimiento de la red de control (1800 imágenes en 1 hora/2 personas –incluyendo piloto autogiro). La toma de fotografías sobre el cauce se obtiene volando con autogiro tripulado biplaza (empresa Girolibre, Aínsa, Huesca). El coste depende de la extensión del tramo (horas vuelo). Se realizaron un total de 4 pasadas desde aguas abajo hacia aguas arriba con alturas medias próximas a los 250 m sobre el río, con el fin de que garantizasen una cobertura (anchura/longitud del cauce) y solape entre fotografías suficiente a la resolución establecida (esencial para aplicar SfM, basado en la extracción de puntos 3D a partir de la identificación de pares comunes de puntos entre imágenes (i.e. Javernick et al., 2014).

3.1.2 Post-procesado: aplicación de técnicas de fotogrametría digital automatizada

Esta fase (Figura 19, C) corresponde con el apartado del procesado de los datos previamente adquiridos en campo (fotografías y red de puntos de control). Se basa en la aplicación de un software fotogramétrico Agisoft PhotoScan Pro ® 1.0.0 (licencia de pago, tipo educacional), en la actualidad, de gran uso debido a su reducido coste para fines educacionales y para la investigación. A continuación, se explica el flujo de trabajo realizado para la obtención de (a) nubes de puntos topográficos georreferenciadas y (b) ortofotos de alta resolución.

La primera fase (Figura 19, C.1.1) consiste en la importación de fotografías y el primer paso de post-procesado: orientación y alineación de las imágenes. Como se cita en el apartado anterior, es imprescindible tener 3 fotografías a distintos ángulos de la misma superficie, para así poder generar la alineación, que supondrá la creación de la nube de puntos a partir de las diferencias de textura. Las características de las fotos originales, a partir de las que obtenemos la nube de puntos, en ocasiones deben ser editadas para eliminar algunos elementos exteriores (e.g. en el caso de este estudio las alas del autogiro; Figura 20). Otras características de las imágenes (i.e. ángulo de incidencia, ruido por vibraciones) podrían tener una influencia en la identificación de texturas, aunque el propio software aplica filtros correctivos automáticos (Agisoft, 2013).

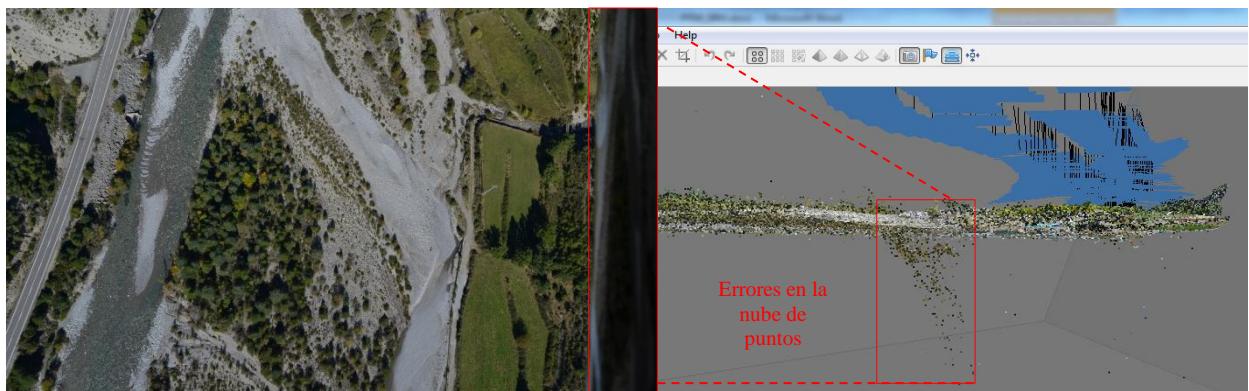


Figura 20. Errores en la nube de puntos una vez realizada la alineación debido a las alas del autogiro de las imágenes originales.

En la primera fase de alineación (*Workflow* → *Align*) existen 2 opciones, en función de que se tengan o no las coordenadas de la cámara desde las cuales se han tomado las fotografías. En este caso (cámara fotográfica sin GPS) se genera una alineación sin coordenadas, obteniendo un primer modelo de nube de puntos un sistema de coordenadas locales (Figura 21). Este proceso, dependiendo del número de imágenes y la potencia del procesador, puede tardar mucho tiempo (e.g: 36 horas con 320 imágenes 5cm/px de resolución y una RAM de 8Gb para el ordenador).

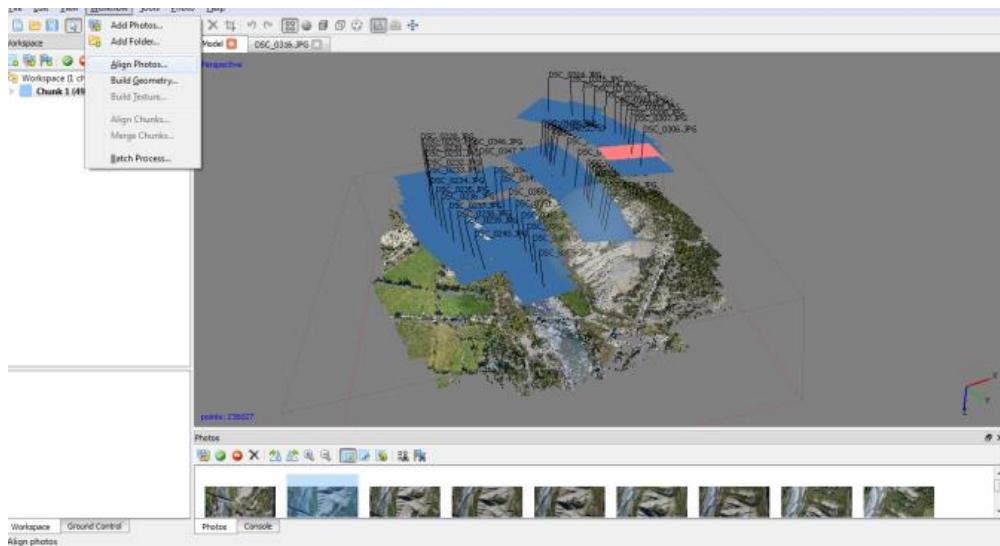


Figura 21. Generación de la nube de puntos a partir de una alineación en coordenadas locales.

La segunda fase (Figura 19, C.1.2) sirve para georreferenciar la nube de puntos creada a partir de la red de control (GCPs) ubicada en el tramo de estudio. Dentro de la fase de georreferenciación existe una serie de parámetros que debemos definir: (a) ajustes de los parámetros para los puntos de control (i.e. sistema de coordenadas, en nuestro caso, siempre el oficial ETRS 89 Huso 31Norte, aunque la zona de estudio está en el límite entre los husos 30 y 31). (b) localización de las *markers* (i.e. dianas) por fotografías (Figura 22D). Estas dianas son los GCPs ubicados en campo (tamaño 22x22cm), de los cuales tenemos coordenadas muy

precisas, como se ha descrito anteriormente. Para generar una geometría correcta en coordenadas reales, se identifican todas las fotos en las que aparezca la misma diana. Este paso es clave en la obtención de la resolución final de la ortofoto, así como de la nube de puntos. Finalmente, (c) importamos las coordenadas x,y,z y número de diana. Este archivo se genera a partir de las coordenadas de los GCPs tomadas a campo y mediante la utilización del software específico @ Leica Geo office versión 7.0 en gabinete (Figura 22).

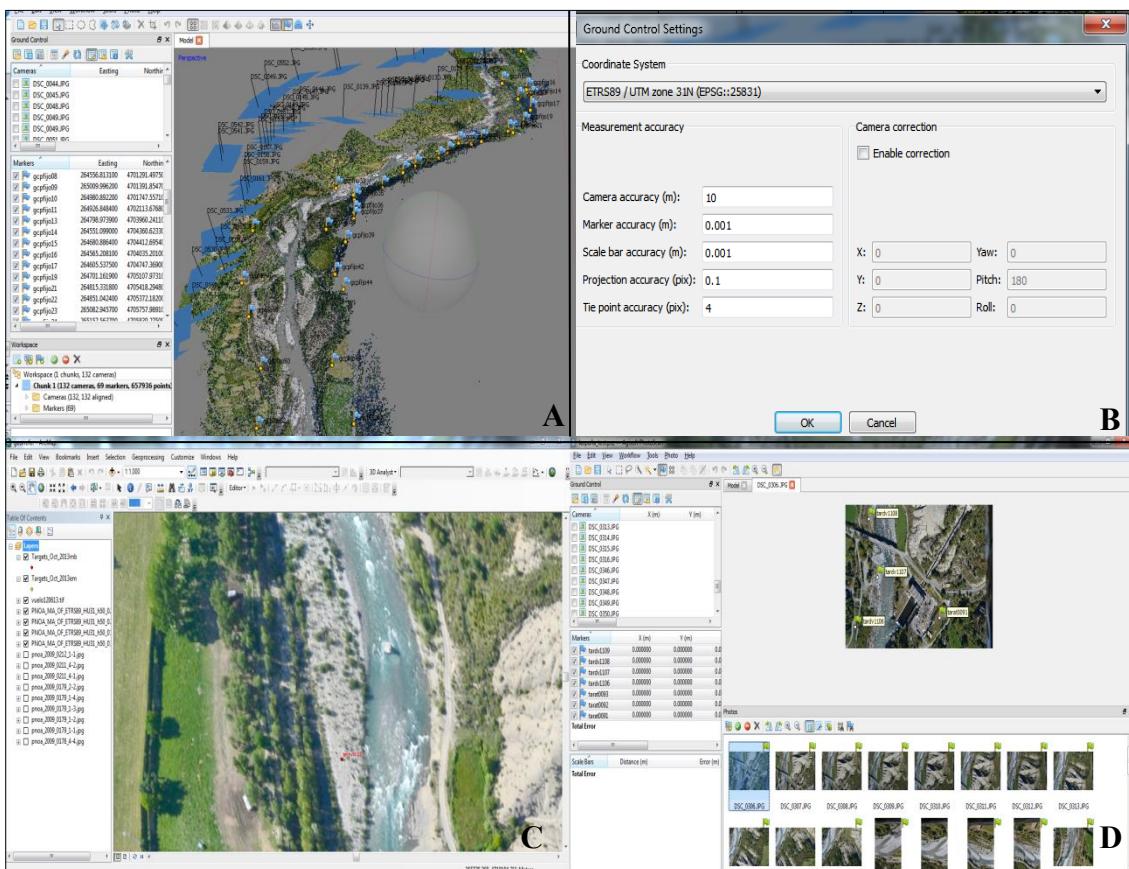


Figura 22. Flujo de trabajo específico correspondiente al proceso de georreferenciación de la nube de puntos en el Agisoft PhotoScan Pro ® 1.0.0 (A) Identificación visual de los puntos de control en cada fotografía. (B) Ajuste del sistema de coordenadas aplicados a los puntos de control (*markers*). (C) Ubicación de las dianas en una ortofoto de referencia (este simple ejercicio, aunque se base en ortofotos de años anteriores es de gran utilidad para la localización de las dianas en las fotos de nueva adquisición). (D) Visualización de los GCPs en el tramo e importación de las coordenadas.

La última fase (Figura 19, C.1.3) implica ya la obtención de la nube de puntos y de las ortofotos. Es importante ver los errores (RMSE, errores cuadráticos medios) del modelo de georreferenciación en la fase anterior, punto analizado en profundidad en el apartado de resultados (Objetivo 2). Para crear la nube de puntos ya georreferenciada (*Workflow* → *build dense cloud*) escogemos los parámetros de (a) calidad/densidad que queremos obtener (determinada por el tamaño de píxel y número de imágenes; 5 densidades) y (b) el filtro de profundidad que aplica el programa (leve, moderado o agresivo). Para obtener una ortofoto a

partir de las fotografías aéreas es obligatorio crear una malla regular (*Workflow → build mesh*), basada en la identificación y regularización de texturas de las imágenes, que permita, entre otros aspectos, la ortorrectificación de las fotografías (Agisoft, 2013). Finalmente, cuando exportamos las ortofotos se tiene la opción de aplicar ciertos factores correctivos de la malla de texturas creadas en el paso previo. Una de ellas es la **enable color correction*, que corrige los valores de brillo y mejora realmente la calidad visual de la ortofoto final (e.g. Figura 23), aunque ralentice el tiempo en el proceso de generación y exportación.

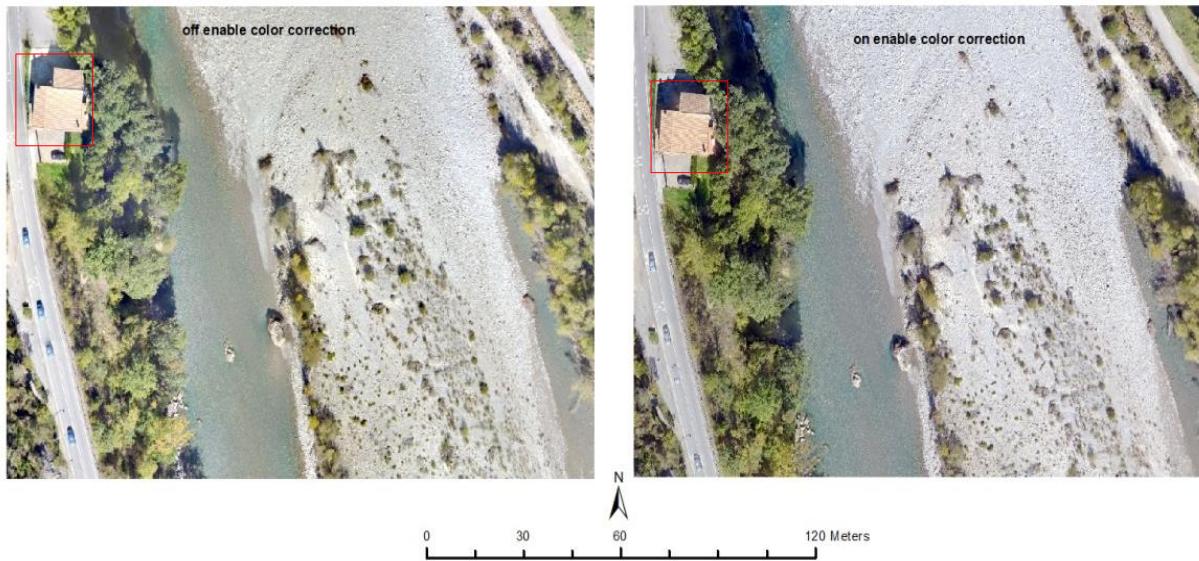


Figura 23. Ejemplo de *color correction* en el proceso de generación de una ortofoto a una resolución de 0.05 m. Las diferencias son claras entre la imagen de la izquierda (desactivado) y de la derecha (activado). La mayor corrección de brillo la aplica en elementos estáticos y vegetación (recuadro rojo).

3.1.3 Post-procesado: regularización de la información

La última fase del post-proceso (Figura 19, C.2) corresponde con la regularización de la información topográfica para la creación de modelos digitales del terreno. Aunque esta fase no se ha desarrollado directamente, puede ser de gran utilidad para estudios posteriores y, por este motivo, se ha decidido incluirla en el flujo de trabajo. Las nubes de puntos generadas disponen de información 3D que es de difícil manejo mediante técnicas SIG convencionales. En este flujo de trabajo se considera que una de las maneras óptimas para generar modelos es la regularización de la nube de puntos mediante geoestadística. En el caso específico de este trabajo, se presenta el algoritmo ToPCAT, desarrollado por Brasington et al., (2012), de libre distribución (ver Figura 24).

La finalidad con la que ha sido desarrollado este algoritmo es para trabajar con nubes de puntos de elevada densidad y superficie (i.e. 10^2 - 10^6 puntos/m² obtenidas a partir de técnicas TLS o SfM). Este algoritmo permite definir una malla regular que se superpone a la nube de puntos y, para cada una de las celdas se calculan una serie de estadísticos: (a) el número total de observaciones (n), (b) el valor mínimo de elevación (zmin) y su posición exacta x,y, (c) el valor máximo de elevación (zmax) y su posición exacta, (d) la elevación media (zmean) dentro de la celda, (e) la desviación estándar de los valores de elevación en cada celda, y (f) la desviación

estándar corregida (subtrayendo a los valores de elevación la pendiente local de cada celda). Se considera desviación corregida (i.e. *detrended standard deviation* en inglés) la desviación estándar de los valores z una vez sustraído en éstos la parte de la elevación causada por el efecto de la pendiente topográfica. Estos valores, se consideran representativos de la rugosidad de la celda. En la figura 24 se muestra de manera esquemática el funcionamiento del algoritmo y los distintos estadísticos que se obtienen una vez procesada la información (más detalles y ejemplos de aplicación en Brasington et al., 2012).

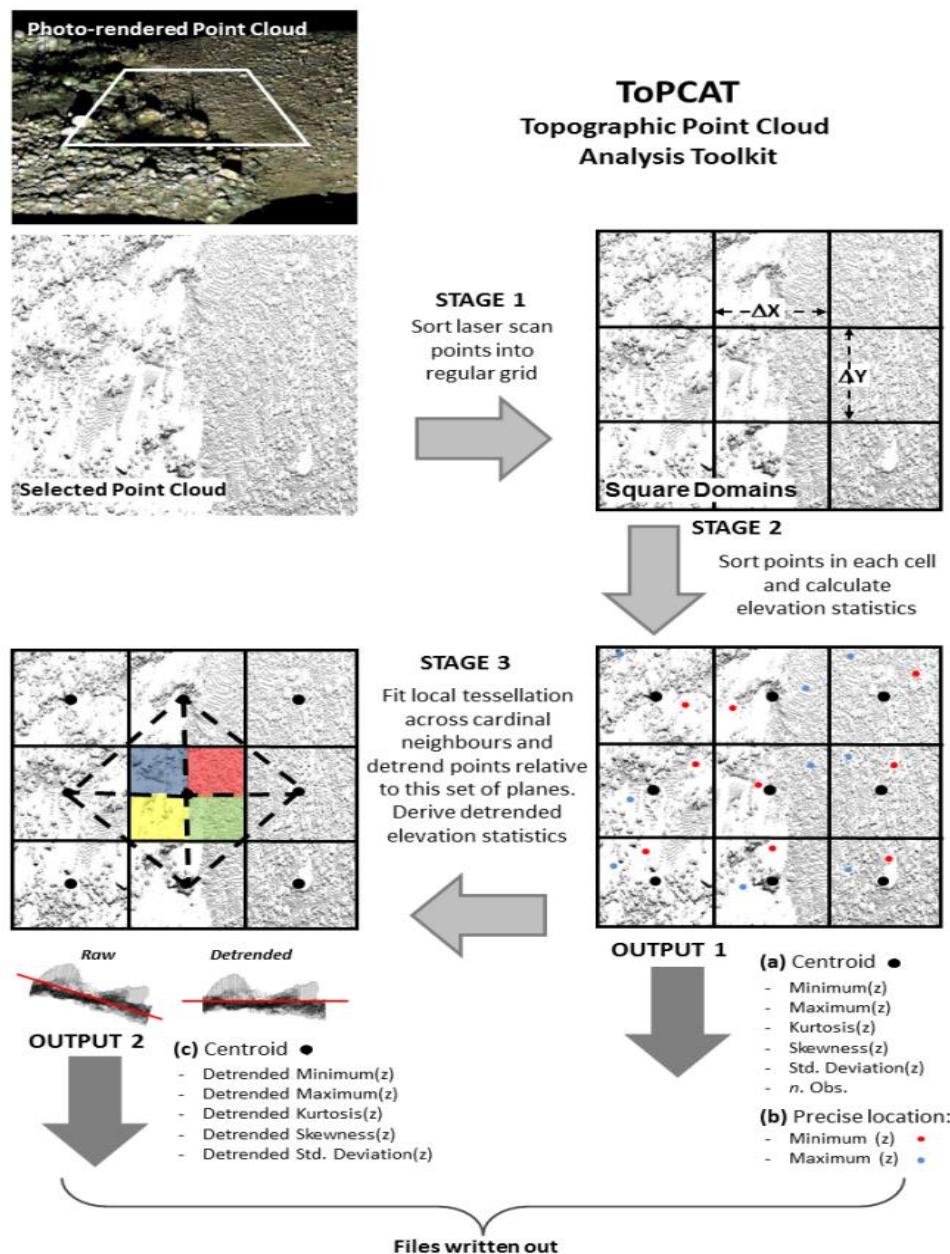


Figura 24. Diagrama de flujo del algoritmo ToPCAT para la regularización de nube de puntos de manera óptima y rápida (extraído de Brasington et al., 2012).

3.2 Análisis de errores

El análisis de los errores asociado a la obtención de información mediante técnicas SfM es el segundo objetivo (O2) de este proyecto. Son numerosas las incertidumbres asociadas a la utilización de SfM para la obtención de información topográfica y ortofotos. Algunas de ellas ya han sido introducidas en el apartado metodológico. Son distintos los autores que han descrito las principales tipologías de errores en la aplicación de técnicas topográficas o de teledetección. Por ejemplo, Hodge et al., (2009) analiza de manera detallada tres tipologías de error asociadas a la aplicación de Láser Escáner Terrestre: (a) errores aleatorios, (b) errores sistemáticos, y (c) errores externos. A continuación se introducen las principales fuentes de error en cada una de estas tipologías, asociadas a la utilización de SfM y, específicamente, para el caso del presente estudio.

Errores aleatorios: estos errores son inherentes en el proceso de obtención de la información topográfica y determinan la **precisión** del método. Las causas de estos errores están mayoritariamente atribuidas al hardware de los equipos de obtención de datos y al post-proceso de la información. En el caso específico de este trabajo, habría que considerar los posibles errores atribuidos a la obtención de datos con el RTK-GPS. En este caso, es muy importante mantener la calidad de los datos GPS dentro de un límite que garantice una precisión aceptable a lo largo del proceso de obtención de datos. En nuestro caso, dada la escala del estudio y el diseño experimental, el límite de calidad que se estableció a la hora de la toma de puntos con el GPS fue de <5 cm (en 3D -x,y,z). Por último, hay que apuntar que los errores aleatorios también están influenciados por el software de post-proceso, en el caso de este proyecto Agisoft Photoscan Pro 1.0.0. Esta tipología de errores es incierta y requeriría un estudio reiterativo de post-proceso con la misma información de base para el correcto análisis de los errores internos del programa.

Errores sistemáticos: estos errores determinan la **exactitud** del método; en el caso de este estudio la diferencia entre la superficie real y la estimada mediante SfM. Aunque las causas de estos errores también vienen determinadas por el hardware de los equipos y el post-proceso de la información, por lo que se refiere al presente proyecto, son dos los principales errores de esta tipología: (a) errores asociados a la densidad de los puntos de control; y (b) errores asociados a la distribución espacial de los puntos de control. Otras fuentes de error serían las asociadas a la calidad de la imagen y a las características de la cámara mediante la que se han obtenido las fotos, y también los asociados a la distancia entre la toma de las fotografías y los elementos a caracterizar.

Errores externos: consideramos esta tipología a la asociada al error humano (u otros factores externos a la propia técnica; e.g. climatológicos). En nuestro caso estos errores podrían ser determinados por (i) la movilización involuntaria de los puntos de control (GCPs) antes de la adquisición de las fotografías aéreas; (ii) la no correcta identificación de los GCPs en las fotografías, y (iii) la incorrecta codificación de los GCPs. Estos errores determinan la **fiabilidad** del método.

En este proyecto se han analizado dos tipos de errores sistemáticos: (a) errores asociados a la densidad de los puntos de control; y (b) errores asociados a la distribución espacial de los puntos de control. El análisis se realiza mediante la *Split Test Approach* (división de los puntos de control). Partiendo de la totalidad de los puntos de control, estos serán

divididos de manera aleatoria en (i) puntos de control y (ii) puntos test o *check*. Esta división permite la utilización de los de control para la georreferenciación y registro de la información (i.e. post-proceso), y el uso de los test para el análisis de la calidad de la información resultante (observado vs estimado mediante SfM; i.e. cálculo exactitud de los resultados). Esta aproximación se aplica de manera amplia en los campos de la teledetección y también para la validación de modelos tanto topográficos como hidráulicos. Los errores se han cuantificado mediante el cálculo del error cuadrático medio o RMSE :

$$\text{Error cuadrático medio o RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^n (y_{obs} - y_{est})^2}{n}}$$

donde,

- y_{obs} es el valor observado o tomado en campo
- y_{est} es el valor estimado o valor obtenido una vez procesada la información

A continuación se describen las particularidades del análisis de los errores asociados a (a) la densidad de los puntos de control; y (b) a la distribución espacial de éstos.

3.2.1 Errores asociados a la densidad de puntos de control

Para este estudio se ha evaluado de forma crítica el error asociado a la densidad (número) de puntos de control utilizados para la georreferenciación o post-proceso de la información. Un total de 203 GCPs distribuidos a lo largo de todo el tramo (4.86 km^2) representa el escenario óptimo. Para este escenario tan solo se puede obtener un error de post-proceso pero en ningún caso se puede realizar el cálculo de la exactitud de la información topográfica resultante. A partir de este escenario, los GCPs se han ido dividiendo en intervalos de 10 % y de manera aleatoria para: (a) la obtención de puntos para la georreferenciación de la información, y (b) puntos para la evaluación de la exactitud de los resultados (puntos test o *check*). Así, el siguiente escenario de análisis consta de 183 GCPs para el post-proceso y georreferenciación de la información (90% de 203); y 20 puntos test o *check* (10 % de 203) para el cálculo del error de la información topográfica obtenida. El siguiente escenario consta de 162 GCPs (80 % de 203) y 41 *check* (20 % de 203); y así sucesivamente. La identificación de estos puntos para cada escenario ha sido realizada con ArcMap 10.1 a partir de la herramienta *subset-point*. La figura 25A muestra de manera esquemática este proceso (i.e. *Split Test Approach*).

Por último, para cada escenario, se han calculado los errores de georreferenciación, y la exactitud de la información topográfica obtenida (diferencia entre las coordenadas de los puntos *check* y la estimada mediante SfM). Para este último análisis se ha calculado el error medio cuadrático o RMSE.

3.2.2 Errores asociados a la distribución espacial de los puntos de control

Para este estudio se ha evaluado de forma crítica el error asociado a la distribución de los puntos de control para la georreferenciación (i.e. post-proceso). También se ha utilizado la proceso *Split Test Approach* pero de distinta forma. En este caso se han identificado 4 patrones espaciales de distribución (siguiendo la metodología de Vericat et al., 2009): (i) en secciones

transversales, (ii) perimetral, (iii) en zigzag o diagonales y (iv) por agrupaciones. Para cada uno de los patrones, se ha dividido la totalidad de los puntos de control (n= 203) en: (a) 50 % para la georreferenciación (i.e post-proceso; n= 102) y (b) 50 % para el estudio de la exactitud (i.e. puntos *check* o *test*; n= 102). Cabe resaltar que el mantenimiento de la densidad de puntos igual para cada patrón espacial de localización de los GCPs permite (i) evaluar si el error de georreferenciación está influenciado por la localización de los puntos de control, y (ii) evaluar el efecto del posicionamiento de los puntos de control sobre la exactitud de la información topográfica. La figura 25B muestra, de manera esquemática, los distintos patrones espaciales evaluados.

Al igual que en el caso anterior, por último, para cada patrón espacial, se han calculado los errores de georreferenciación, y la exactitud de la información topográfica obtenida (diferencia entre las coordenadas de los puntos *check* y la estimada mediante SfM). Para este último análisis se ha calculado el error cuadrático medio o RMSE.

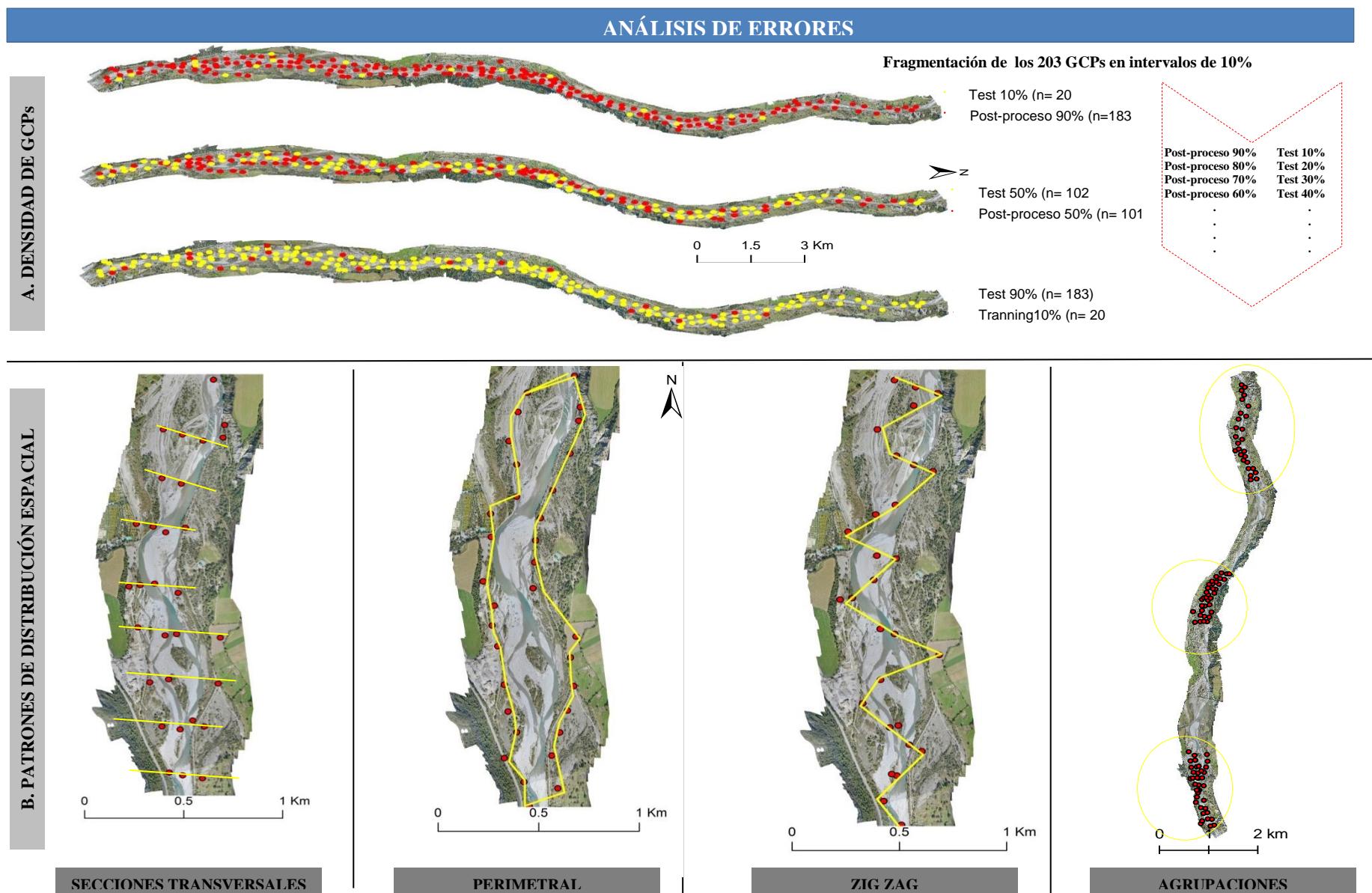


Figura 25. (A) Análisis de errores asociados a la densidad de los puntos de control para el post-proceso. (B) Análisis de errores asociados a la distribución espacial teniendo en cuenta 4 patrones geométricos de estudio.

3.3 Validación de los modelos topográficos

En este apartado se presenta la metodología asociada al Objetivo 3 (O3) con la finalidad de validar la calidad de los datos obtenidos mediante SfM. De manera específica, la información topográfica obtenida mediante la metodología que se ha descrito en este trabajo (Objetivo 1) ha sido validada con información topográfica de elevada precisión obtenida con Láser Escáner Terrestre (TLS). Este análisis se ha realizado mediante la delimitación de una zona de control en la parte superior del tramo (puente de Laspuña). Aunque un correcto análisis de validación requeriría una mayor extensión del tramo a comparar o una mayor representatividad de la extensión a lo largo del área de estudio, se trata de un ejercicio preliminar para un análisis crítico del método que se presenta en este proyecto. Esto ha propiciado que el estudiante haya aplicado nuevos métodos y se haya familiarizado con datos relacionados con la temática del máster que ha realizado. A continuación se presentan las fases y particularidades que conlleva este análisis.

3.3.1 Adquisición de datos de campo mediante Láser Escáner Terrestre

En la figura 26A se muestra el flujo de trabajo para la adquisición de datos de campo con TLS. Antes de desarrollar el flujo de trabajo que se aplicó en este estudio es necesario explicar los detalles de la superficie seleccionada para realizar este análisis. La delimitación del tramo de control se realizó en base a dos criterios: (a) la disponibilidad de un puente que garantizaba (i) un mayor ángulo de incidencia del láser en el momento de toma de datos a las secciones fluviales, factor determinante para una mayor densidad de observaciones con un mínimo de estacionamientos; y (ii) la aparición de superficies llanas en los escáneres (asfalto del puente). Por último, el tramo elegido también disponía de (b) una sección de roca madre altamente variable a nivel topográfico que propiciaba una zona de gran interés a comparar. Así, la comparación entre la información topográfica obtenida con SfM y TLS se separó en base a las características topográficas de ambas zonas: se ha realizado una validación de SfM para superficies llanas (i.e. puente) y para superficies rugosas (i.e. roca madre en el margen izquierdo; ver las dos zonas de análisis en la ortofoto de la figura 26, A.3).

Para la adquisición de los datos con TLS se ha utilizado un escáner terrestre de corto alcance modelo Leica ScanStation C10®. Los datos se obtuvieron en enero de 2014. Aunque estos datos no se obtuvieron el mismo día en el que se realizó el vuelo para la aplicación de SfM, las superficies a comparar no han tenido deformación entre los dos períodos. Tanto la roca madre como el asfalto no presentan cambios substanciales para períodos temporales tan cortos (3 meses). Para la adquisición de datos TLS se hicieron 2 estacionamientos del láser con una resolución de 2cm a 50 m. Se ubicaron 4 dianas circulares con trípodes, cuyas coordenadas (x,y,z) fueron tomadas con un Leica VIVA® GS15 en RTK. Las coordenadas se obtuvieron en configuración RTK, pero en modo estático. Esta configuración permite obtener coordenadas con mayor calidad, aunque el tiempo necesario para la toma de estas es mayor. La calidad de las coordenadas de las dianas (3D) fue inferior a los 2 cm.

3.3.2 Post-proceso de la información y comparación de la información topográfica

La figura 26B muestra, de manera esquemática, la fase de post-proceso de la información topográfica obtenida con TLS, y la metodología utilizada para validar la información topográfica obtenida con SfM para cada una de las superficies de análisis: (a) superficie lisa y (b) rugosa o variable. Por lo que se refiere al post-proceso de la información TLS, una vez adquiridos los datos en campo, se han registrado los dos escáneres y se ha georreferenciado la nube de puntos. Los datos del TLS se han post-procesado mediante Leica Cyclone 8.1®. A partir de la ortofoto obtenida con la metodología que se presenta en este proyecto, se han delimitado las áreas de estudio o de análisis: superficies lisas y rugosas (Figura 26B). Se han exportado los datos topográficos obtenidos mediante TLS y SfM para cada una de estas superficies o áreas de análisis.

Para comparar las nubes de puntos obtenidas con SfM y TLS se ha utilizado el software libre Cloud Compare v2.5.3®. Tal y como muestra la figura 26, B.3, este software permite, de manera rápida, el cálculo del vector resultante de comparar la localización 3D de dos observaciones topográficas. En el caso de este proyecto, *Obs TLS* se refiere a un punto obtenido mediante Láser Terrestre, mientras que *Obs SfM* se trata del punto más próximo a *Obs TLS*, pero obtenido mediante SfM. La longitud del vector determina el residual entre las dos observaciones, y en nuestro caso, el error de SfM debido a que se considera que el TLS proporciona la superficie real de cada área de análisis. Los resultados de Cloud Compare v2.5.3® permiten obtener las distribuciones de los residuales para cada una de las superficies, y así, calcular las correspondientes curvas de frecuencias acumuladas y los percentiles asociados a éstas.

VALIDACIÓN DE LOS MODELOS TOPOGRÁFICOS (TLS vs SfM)

A. ADQUISICIÓN DE DATOS TLS



A.1. 2 Estacionamientos del Laser Escáner Terrestre, modelo ScanStation C10 de Leica Resolución: 2cm a 50metros



A.2.1. Posicionamiento de 3 dianas para la orientación del TLS y posterior georreferenciación en coordenadas globales

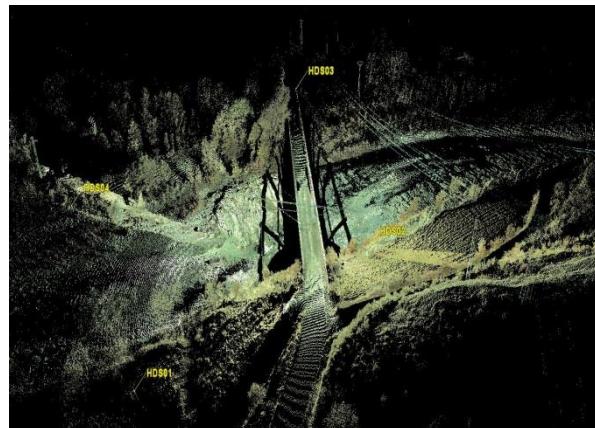


A.2.2. Coordenadas de las dianas tomadas con GPS-RTK con calidades 3D inferiores a 2 cm

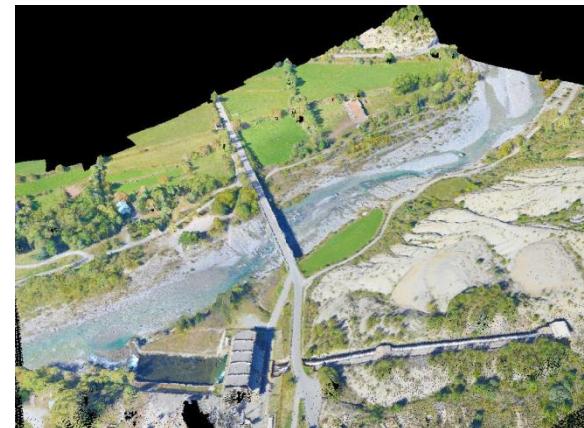


A.3. Escaneo de 2 tipos de superficie según su rugosidad: (i) lisa (izquierda, puente) y (ii) rugosa (derecha, lecho en roca con bolos)

B. POSTPROCESO: COMPARACIÓN NUBE DE PUNTOS



B.1. Nube de puntos obtenida por el TLS. Post procesada con el software Leica Cyclone 8.1 ®. Se observa la localización de las 4 dianas en amarillo.



B.2. Nube de puntos obtenida por SfM con el software ® Agisoft Photoscan Pro 1.0.0



B.3. Validación: vector de desplazamiento entre cada punto observado con SfM y TLS. Software libre utilizado: Cloud Compare v2.5.3 ®

Figura 26. Metodología del proceso de validación de la nube de puntos topográfica obtenida mediante SfM: (A) adquisición y (B) post-proceso de datos TLS y comparación de valores topográficos. Se considera la información TLS como puntos del terreno reales.

51

4. RESULTADOS

4.1 Obtención de nubes de puntos, ortofotos y modelos topográficos

A continuación, se presentan los resultados obtenidos tras aplicar técnicas novedosas en topografía a escala de tramo fluvial (i.e. SfM) siguiendo el flujo de trabajo que se ha desarrollado y validado en este proyecto. De manera específica, en esta sección se presenta: (i) la información topográfica obtenida para el conjunto del tramo de estudio (i.e. nube de puntos de alta densidad); (ii) la ortofoto resultante a una resolución de 5 cm y, de manera complementaria, (iii) un modelo topográfico a escala de barra fluvial elaborado mediante el filtrado y regularización de la información aplicando ToPCat (ver métodos, 3.1.2).

4.1.1 Nube de puntos: fotogrametría digital automatizada

Mediante la aplicación de la metodología que se presenta en este trabajo, se han podido obtener varias nubes de puntos topográficas con información 3D (xyz) de diferentes densidades (puntos/m²), todas ellas con precisiones centimétricas (Figura 27 y 28). Se han utilizado un total 1305 fotografías aéreas tomadas sobre el cauce del Alto Cinca en octubre de 2013. Para el post-proceso de la información se estableció una red de 220 puntos de control distribuidos espacialmente a lo largo de todo el tramo. Un total de 17 puntos de control fueron eliminados debido a la detección de errores externos, atribuidos, probablemente, a la movilización de los puntos de control una vez obtenida su localización y antes de realizar el vuelo (asociado a animales/viento). La tabla 4 muestra la información asociada a las características y resoluciones de las imágenes, las características de la cámara fotográfica utilizada, y algunos detalles del vuelo en el que se obtuvieron las fotografías.

Tabla 4. Características de las imágenes obtenidas, de la cámara de fotos utilizada y altura del vuelo realizado en octubre de 2013. El post-proceso de esta información ha proporcionado información topográfica de elevada densidad.

Característica	
Cámara	NIKON D3100 (18 mm)
Distancia focal	18 mm
Modo disparo cámara	ISO automático, modo deporte
Resolución de las imágenes	5 – 6 cm
Número de estaciones (posiciones cámaras)	1305
Número puntos comunes (tie-points)	6148969
Altura de Vuelo	235 m
Líneas de vuelo (pasadas)	4

Agisoft PhotoScan Pro permite generar información topográfica a diferentes densidades. Esta opción es muy interesante y de gran utilidad, para generar sólo aquella información que se adecue al objetivo del trabajo. La primera nube de puntos, tras la alineación, siempre es de baja densidad (en este caso de 1.27 puntos/m²). Una vez georreferenciada la información, podemos generar un producto con mucha más resolución espacial, siempre dependiendo de la resolución y del número de fotografías originales. En el caso del estudio que se presenta en este proyecto, se ha desarrollado una nube de puntos de 32.5 puntos/m² (densidad media), aplicando un filtro agresivo para eliminar los valores atípicos. La figura 27 muestra dos ejemplos de la información topográfica 3D obtenida. Se trata de dos tramos de alta complejidad topográfica. Se observa la elevada resolución de la información producida, lo que permite la identificación de árboles, cárcavas, casas y otros elementos de interés.

El error total de post-proceso (Figura 27, A.5) para todo el tramo de estudio es de 0.14 m. Este error esta expresado como el error cuadrático medio entre la coordenada real de cada GCP y la coordenada resultante una vez procesada y registrada la información. El error total corresponde a la suma cuadrática de los errores de posicionamiento en planta (x e y) y de los errores en la elevación (z). El error cuadrático medio para cada una de las coordenadas oscila entre los 6 y 10 cm (ver Figura 27A). Cabe resaltar y recordar, que estos errores representan los residuales de las coordenadas de los GCPs utilizados para la georreferenciación y registro de la nube de puntos, en cualquier caso se han utilizado puntos *test* o *check* para estimar la exactitud del modelo. Este análisis se realizará en el apartado 4.2 y 4.3 de los resultados. Para mostrar el efecto del aumento de la densidad de la información, se ha seleccionado una barra fluvial en las proximidades del camping de la Peña Montañesa, Labuerda (Figura 27, A.2 y A.4). Para esta barra se ha generado una nube de puntos a baja densidad (1.7 puntos/m²) y a media densidad (20.3 puntos/m²). Se puede observar en la figura 27A la diferencia entre densidades, tanto a nivel visual como a nivel numérico en la tabla adyacente.

Uno de los aspectos que este proyecto no analiza, pero que es necesario apuntar, es la posibilidad de utilizar esta metodología para superficies ubicadas debajo del agua. Es el caso de los cauces fluviales con bajas profundidades (siempre y cuando se pueda observar en la fotografía). A modo de ejemplo, la figura 27A, muestra como el programa parece que extrae valores topográficos para el cauce mojado. Son pocos los estudios realizados en los que se valide SfM para estas condiciones. Para técnicas fotogramétricas convencionales, Fryer (1983) desarrolló un factor correctivo de refracción que permitía la utilización de estas técnicas. Recientemente, Tamminga et al., (2014) y Woodget et al., (2014) muestran como un factor correctivo similar al desarrollado por Fryer se puede aplicar para SfM, y como para profundidades relativamente pequeñas, la no aplicación de ningún factor correctivo no genera errores de elevada magnitud (inferiores a los 10 cm). El desarrollo de una metodología específica para estas condiciones permitiría obtener información batimétrica, y por tanto, información topográfica del cauce mojado. La elevada turbidez del agua y las turbulencias superficiales en rápidos son factores limitantes que requieren más investigación.

Por último, apuntar que Agisoft PhotoScan Pro permite la generación de un Modelo Digital de Elevaciones (MDE) directamente, sin filtrado ni regularización. La figura 27, A.3 muestra un ejemplo para un área de 6.68 km² a una resolución de 0.23 m. Hay que tener en cuenta que la información topográfica mediante la que se desarrolla este MDE, tal y como se ha indicado, no está filtrada y carece de regularización. Además, se trata de un MDE, y en muchos casos (zonas con elevada densidad de vegetación) podría no representar la superficie (i.e. MDT). Esto podría generar ciertas incertidumbres en los resultados si el objetivo es el análisis de los cambios topográficos de una superficie determinada. Por este motivo, tal y como describe Brasington et al., (2012) para el caso de datos topográficos obtenidos mediante TLS, se aconseja un filtrado con técnicas de geoestadística para una mejora en la creación de modelos topográficos, y productos adicionales como modelos de rugosidad. En el caso de este trabajo, se presenta un ejemplo de filtrado y regularización en la sección 4.1.3.

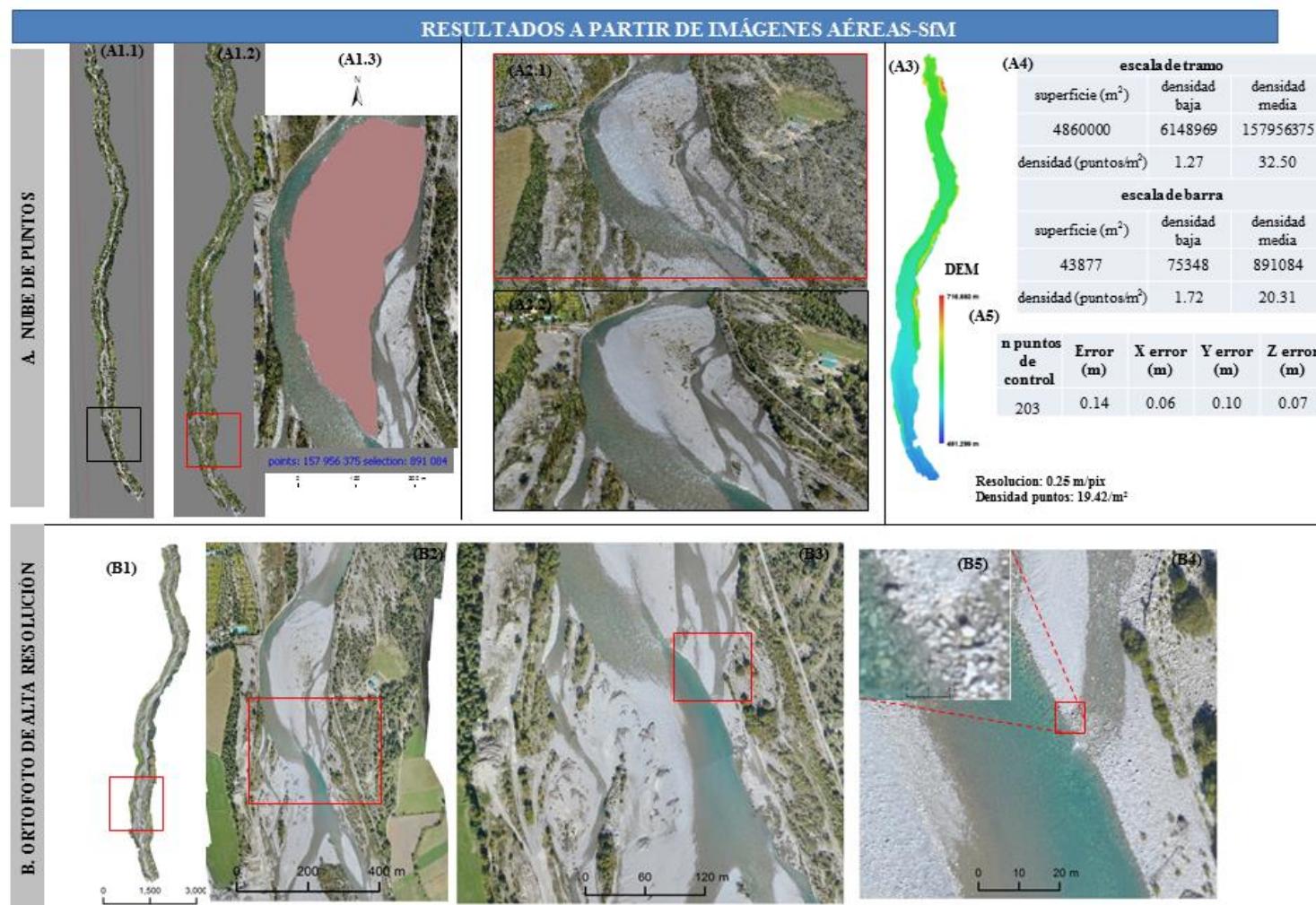


Figura 27. Resultados obtenidos a partir de fotografías aéreas digitales aplicando SfM.. (A) Nube de puntos topográfica del cauce del tramo de estudio (13 km). Nube de puntos con (A.1.1) baja y (A.1.2) media densidad a escala de tramo y a escala de barra (A.2 y A.2.1). Cabe destacar que las observaciones topográficas se han coloreado a partir de los valores RGB de la fotografía; por este motivo y por la elevada densidad parece que se trata de una fotografía aunque representa la nube de puntos. (A3) Modelo Digital de Elevaciones sin regularización ni filtrado de la información topográfica. (A4) Valores de densidad de las nubes de puntos obtenidas a escala de tramo y de barra. (A5) Errores cuadráticos medios asociados al post-procesado y obtención de la información topográfica. (B) Visualización en varias escalas de la ortofoto generada de altísima resolución (5 cm). Todos los resultados georreferenciados en ETRS 89 HUSO 31N.

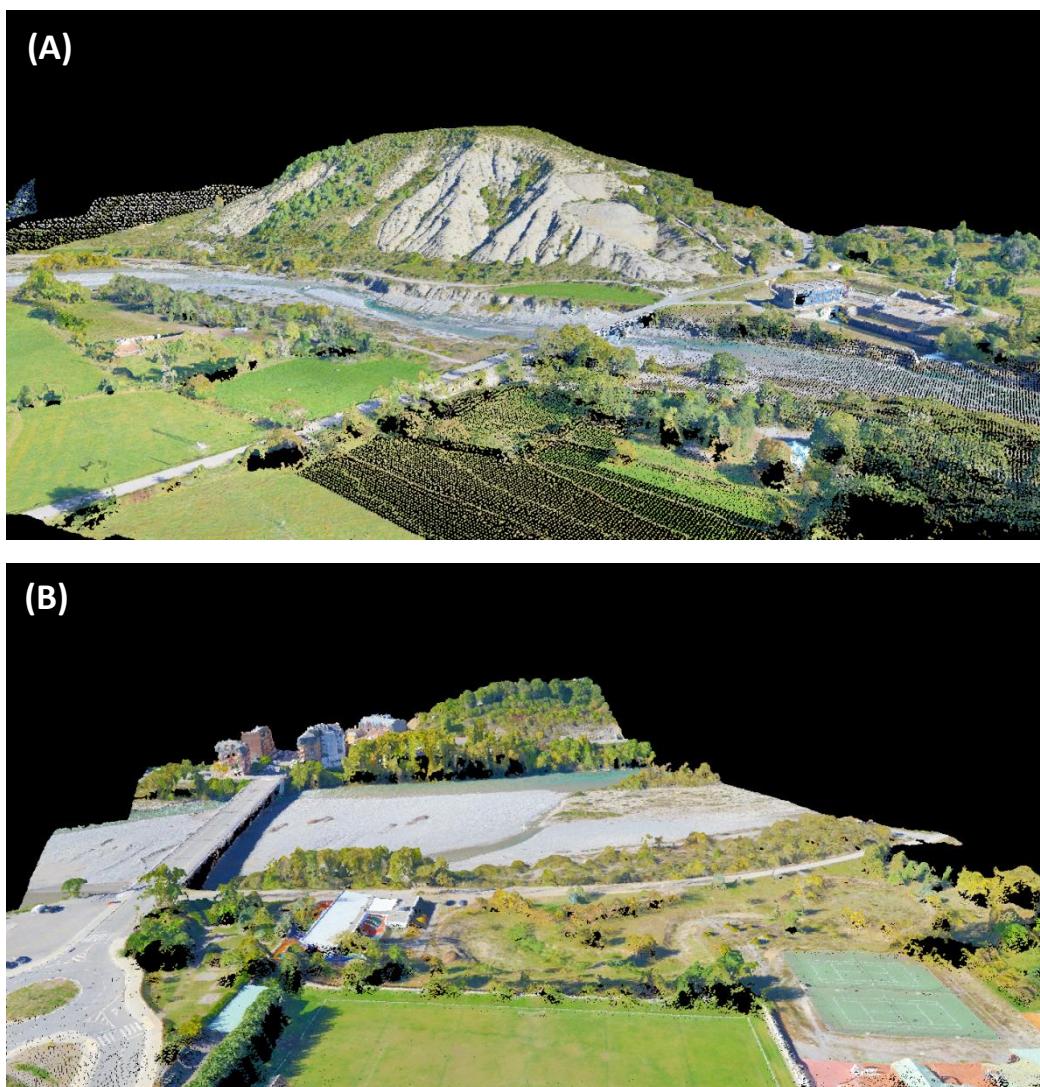


Figura 28. Ejemplo de la información topográfica 3D obtenida a partir de la aplicación de la metodología que se presenta en este trabajo: (A) zona de inicio de tramo de estudio (aguas arriba); puente de Laspuña; y (B) zona final de tramo de estudio (aguas abajo); puente de Ainsa.

4.1.2 Ortofoto de alta resolución

Tal y como se ha indicado anteriormente, el flujo de trabajo que se presenta en este proyecto permite obtener ortofotos de elevada resolución. La figura 27B, muestra el resultado para el vuelo de octubre de 2013. En este caso, la ortofoto dispone de una resolución de 5 cm, directamente relacionado con las características del vuelo que se presentan en la tabla 4. Cabe destacar que el vuelo que se presenta en este proyecto se realizó con el objetivo de obtener imágenes con una resolución próxima a los 5 cm, aunque la resolución podría ser mayor si se volase a una altura menor, siguiendo los resultados del diseño experimental (relación cámara-distancia-resolución). Los resultados del diseño experimental permiten buscar la altura de vuelo necesaria para adquirir imágenes a una determinada resolución (Figura 19, A.3).

La figura 27B muestra el detalle de la información a múltiples escalas. Se puede observar cómo se identifican cantos individuales ubicados en las barras de manera visual. Estas ortofotos, podrían ser utilizadas para generar mapas granulométricos, morfológicos o de hábitat

siguiendo técnicas de geoestadística como las que presenta Verdú et al. (2005) para el caso de la granulometría de lechos de gravas y cantes.

4.1.3 Filtro de la información y generación de modelos 2D

En esta sección se presenta un modelo topográfico a escala de barra fluvial elaborado mediante el filtrado y regularización de la información aplicando ToPCAT (ver metodología). La figura 29, muestra los resultados obtenidos para la barra ubicada en las proximidades del camping Peña Montañesa (Labuerda, mismo ejemplo que en la figura 27). Tal y como se observa en la figura 29A, se trata de una barra y llanura de inundación con una elevada complejidad topográfica. Esta característica podría generar una elevada incertidumbre en el cálculo de un modelo digital del terreno sin previo filtro y regularización de la información. Estas características también se tendrían que considerar si se calculase un MDE directamente con Agisoft PhotoScan Pro sin previo filtro o clasificación de la nube de puntos.

La figura 29B, presenta el Modelo Digital del Terreno (MDT) obtenido a escala de barra. Para el cálculo de este modelo, en primer lugar, se ha exportado la nube de puntos generada mediante SfM (tan solo se han exportado los puntos dentro del área de interés). La densidad de puntos en esta área oscila entre los 8 y los 188 puntos/m². Se ha creado un archivo *.pts (i.e. archivo x,y,z de texto) que será el que se importará a TopCat. Cabe destacar que TopCat es de libre distribución (ver Brasington et al., 2012) y se puede ejecutar mediante Phyton. Adicionalmente, también se puede instalar la extensión *Geomorphic Change Detection* de ArcMap, realizada por el equipo del Dr. Joe Wheaton en *Utah State University* (ver <http://gcd6help.joewheaton.org/>) y que incluye el propio algoritmo TopCat, además de otras opciones para comparar superficies topográficas. Se ha ejecutado TopCat con una malla regular de 0.5 metros. De entre los resultados, se ha utilizado el valor de elevación mínimo (Zmin) dentro de cada celda de la malla. Los resultados se han importado en ArcMap (agregar datos XY). Se ha generado un TIN y posteriormente un RASTER mediante la extensión *3D analyst*, con una resolución de 0.5 metros. Tal y como se ve en la figura 29B, el resultado permite diferenciar la complejidad topográfica de la barra. Se pueden observar los distintos canales que disecan la parte inicial de la barra, debido a la elevada sedimentación en esta zona, condicionada por el elevado gradiente horizontal hacia el margen derecho.

Además de este resultado, TopCat proporciona una serie de estadísticos que pueden ser de gran interés para el análisis de la información topográfica de la nube de puntos (ver metodología). Uno de estos estadísticos es la desviación estándar corregida. Se considera desviación corregida (i.e. *detrended standard deviation* en inglés) la desviación estándar de los valores de elevación z, una vez sustraído en éstos la parte de la elevación causada por el efecto de la pendiente topográfica. Tal y como se describe en la metodología, estos valores se consideran representativos de la rugosidad de la celda. Por ejemplo, si nos ubicamos en un talud con vegetación, el cálculo de la desviación estándar corregida nos proporcionaría información de la complejidad topográfica en una celda atribuida directamente a la vegetación. En el caso de que se utilizase la desviación estándar de las elevaciones sin ninguna modificación, este valor representaría la complejidad topográfica resultante de la pendiente y de la vegetación. En el caso de la figura 29C, se ha ejecutado TopCat, pero con una malla de 1 metro (con el objetivo de ampliar la malla de análisis). Posteriormente, los resultados de la *detrended standard deviation* se han importado en ArcMap (agregar datos XY). Se ha generado un TIN y posteriormente un RASTER mediante la extensión *3D analyst* con una resolución de 1 metro.

Una vez generado el modelo, se ha reclasificado. Todos los valores inferiores a 20 cm se han clasificado como *NoData*, mientras que los valores superiores a 20 cm se considera que representan la vegetación (color rojo en la Figura 29C). Comparando los resultados y la figura 29^a, se observa como mediante este cálculo se puede identificar la vegetación con un elevado acierto. A destacar que el valor de 20 cm es arbitrario en este estudio, ya que este cálculo se ha realizado para mostrar las oportunidades que ofrece TopCat gracias a la densidad de las observaciones obtenidas mediante SfM.

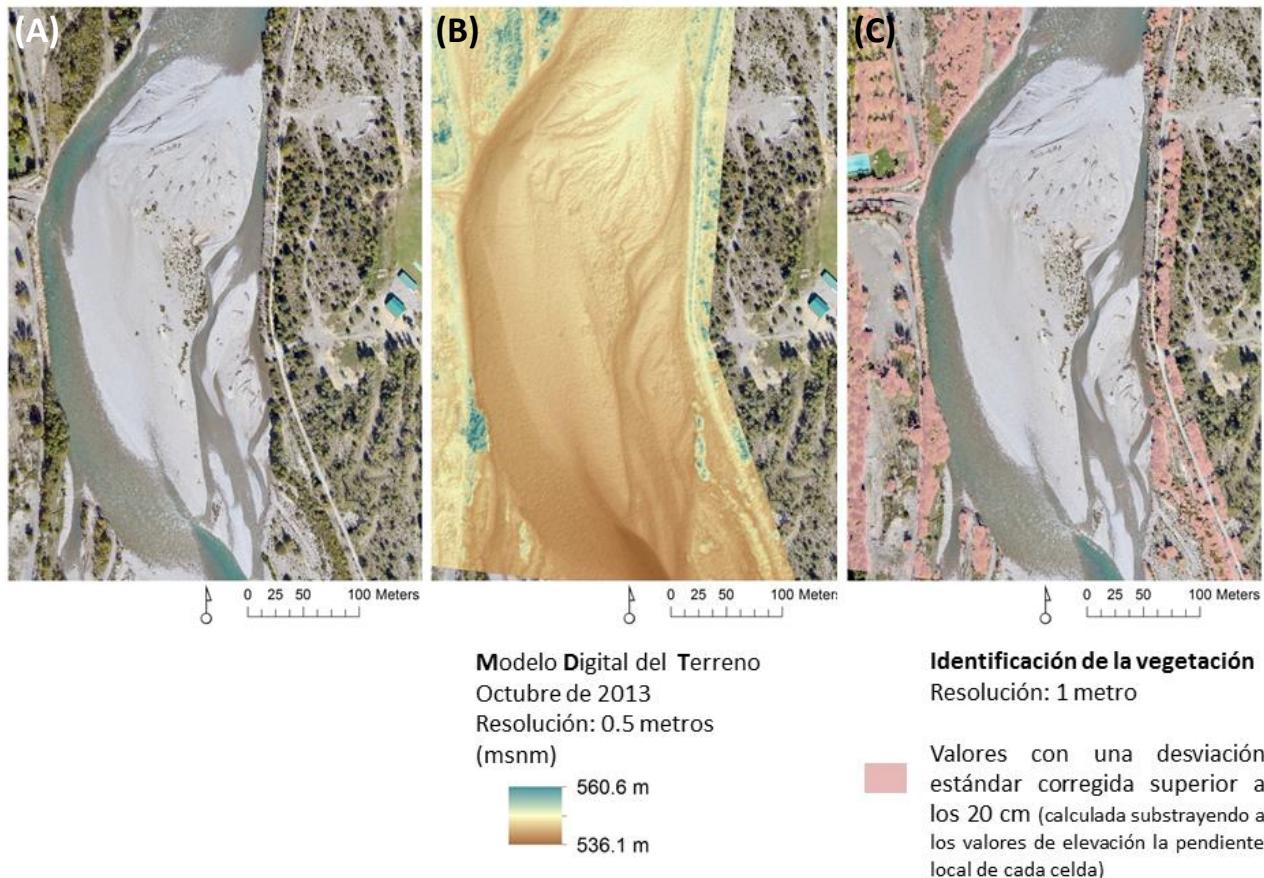


Figura 29. (A) Ortofoto a escala de barra en las proximidades del camping Peña Montañesa. (B) Modelo Digital del Terreno (MDT) con una resolución de 0.5 metros generado a partir de los valores de elevación mínima (Zmin) calculados con TopCat (malla de 0.5 x 0.5 metros). (C) Ejemplo de identificación de vegetación automática mediante la aplicación de la desviación estándar modificada (*detrended standard deviation*). En este caso se ha ampliado la malla de análisis a 1 metro. El modelo inicial se ha reclasificado y tan solo se representan aquellas celdas con desviaciones modificadas superiores a los 20 cm. Se considera que estas celdas representan la vegetación tal y como se observa al comparar su distribución con la ortofoto de (A). Es importante tener en cuenta (i) el área de análisis; que corresponde al polígono que determina el Modelo Digital del Terreno en (B). (ii) No se ha aplicado ningún factor correctivo de refracción para la obtención de la información batimétrica (cauce mojado).

4.2 Análisis de errores

A continuación se presentan los errores de post-proceso o georreferenciación, y la exactitud de la información topográfica obtenida teniendo en cuenta (a) la densidad de GCPs y (b) su distribución espacial (patrones de localización).

4.2.1 Efectos de la densidad de puntos de control

Para este análisis se ha reducido el número de puntos de control utilizados para el post-proceso progresivamente (intervalos del 10%), partiendo de un escenario óptimo de 203 GCPs. Los puntos que se eliminan de la red de puntos de control para el post-proceso se han utilizado como puntos test o check para evaluar la exactitud de los resultados topográficos obtenidos (ver más detalles en el apartado metodológico). Tal y como se observa en la figura 30, para el escenario óptimo (con la totalidad de los puntos de control) no se dispone de puntos test para el análisis de la exactitud o calidad de los datos topográficos. Para este escenario, el error cuadrático medio total (x, y, z) de los puntos de control es de 0.2 metros. El RMSE de cada una de las coordenadas oscila entre 0.08 y 0.12 m (Figura 31, que corresponde a xyz).

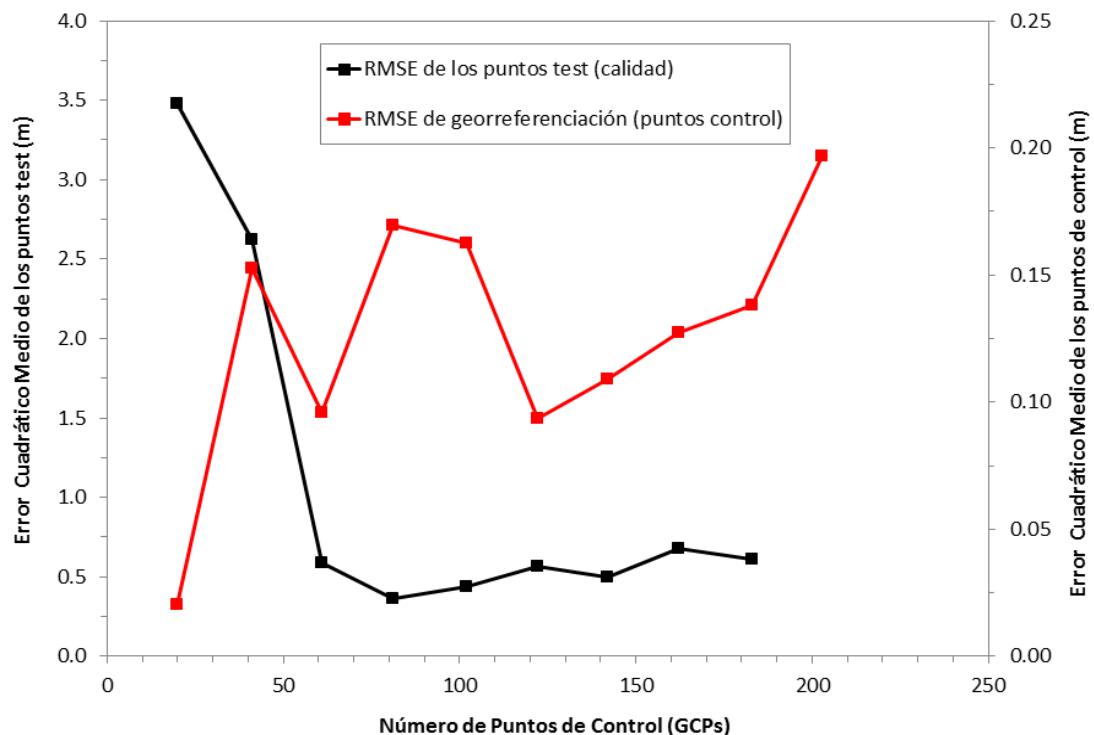


Figura 30. Distribución de los errores cuadráticos medios de los puntos de control (error de post-proceso o georreferenciación) y de los puntos test o *check* (calidad o exactitud del modelo). Se parte de un escenario óptimo con 203 GCPs. El último escenario analizado dispone de 20 GCPs para el post-proceso de la información y 183 puntos test. La selección de los puntos se ha realizado de manera aleatoria y a partir de la *Split Test Approach* (división de los puntos de control; ver metodología).

La figura 30 muestra como el RMSE de los puntos de control es relativamente bajo para cada uno de los escenarios de análisis. De manera específica, este valor oscila entre 0.2 y 0.025 metros. Además, contrariamente de lo que uno podría esperar, una reducción en exceso de los GCPs se asocia con una mejora del RMSE (i.e. el RMSE para el escenario de 20 GCPs es de aproximadamente 0.025 metros). Este comportamiento es común para las tres coordenadas (x,y,z) de los puntos de control (Figura 31). Este resultado nos indica la importancia de los puntos test o *check* para la evaluación crítica de la calidad de los datos. Estos puntos nos muestran un comportamiento inverso al descrito anteriormente. Una reducción de los GCPs utilizados para el post-proceso de la información, reduce sustancialmente la calidad de la información topográfica resultante, hasta alcanzar errores de magnitud métrica (e.g. 3.5 metros para el escenario de 20 GCPs y 183 puntos test). Esto se debe a que la utilización de pocos GCPs facilita el cálculo de un modelo de georreferenciación o transformación simple, y con pocos errores relativos, pero a su vez, éste no representa la complejidad real del conjunto del área a post-procesar, debido a la baja densidad de puntos de apoyo. Así, aunque parece que la información topográfica sea de elevada calidad, el cálculo simple de los parámetros de transformación o georreferenciación genera errores substanciales cuando se observan los RMSEs de los puntos test o *check* (Figuras 30 y 31).

Se concluye que la utilización de 61 GCPs para el post-proceso de la información proporciona el escenario más óptimo, ya que combina errores aceptables (i.e. 0.09 y 0.45 metros; post-proceso y calidad respectivamente) con el menor número de puntos de control posible. Esta densidad de puntos es suficiente para el correcto cálculo de un modelo de transformación o georreferenciación óptimo. Para el caso de este estudio, este valor corresponde a 4.7 GCPs por quilómetro lineal de río. A destacar que, aunque este valor puede ser de gran interés para el diseño experimental de otros estudios, requeriría de más casos de estudio para su estandarización. Además, es necesario tener en cuenta que puede variar en función, por ejemplo, de los métodos de toma de las coordenadas de los GCPs.

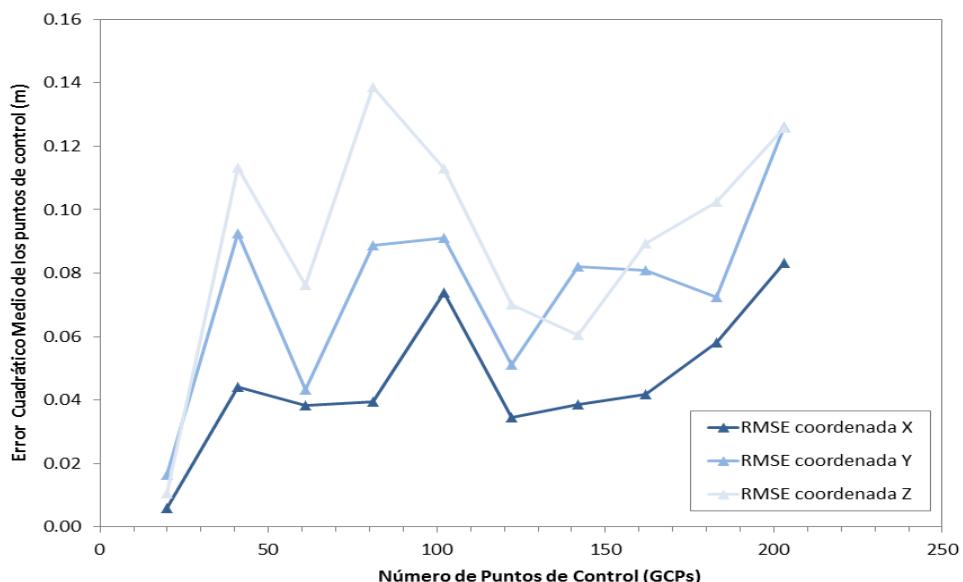


Figura 31. Distribución de los errores cuadráticos medios de las 3 coordenadas (x,y,z) de los puntos de control (error de post-proceso o georreferenciación). Se parte de un escenario óptimo con 203 GCPs. El último escenario analizado dispone de 20 GCPs para el post-proceso de la información y 183 puntos test. La selección de los puntos se ha realizado de manera aleatoria y a partir de la *Split Test Approach* (división de los puntos de control; ver metodología).

4.2.2 Efectos de la distribución espacial de los puntos de control

En este apartado se evalúa si la localización de los puntos de control determina la magnitud de los errores de post-proceso y la calidad de la información resultante. Para este estudio, se han identificado 4 patrones espaciales de distribución (siguiendo la metodología de Vericat et al., 2009): (i) en secciones transversales, (ii) perimetral, (iii) en zigzag o diagonales y (iv) por agrupaciones. Para cada uno de los patrones, se ha dividido la totalidad de los puntos de control (n= 203) en: (a) 50 % para la georreferenciación (i.e. post-proceso; n= 102) y (b) 50 % para el estudio de la exactitud (i.e. puntos *check* o *test*; n= 101). Según los resultados obtenidos en el apartado anterior, esta densidad de puntos se sitúa por encima de la óptima. Además, tal y como se ha descrito anteriormente, el mantenimiento de la densidad de puntos igual para cada patrón espacial de localización de los GCPs permite (i) evaluar si el error de georreferenciación está influenciado por la localización de los puntos de control (i.e. densidad vs localización), y (ii) evaluar el efecto del posicionamiento de los puntos de control sobre la exactitud de la información topográfica obtenida.

Los resultados de este análisis se presentan en la figura 32. Al igual que en el estudio anterior, los RMSE asociados al post-proceso o georreferenciación de la información, son relativamente bajos y, aunque existe cierta variabilidad, la magnitud de ésta es mínima (oscilan entre los 0.125 y 0.145 metros). Los patrones con mayor error de post-proceso son los de distribución perimetral y por agrupaciones.

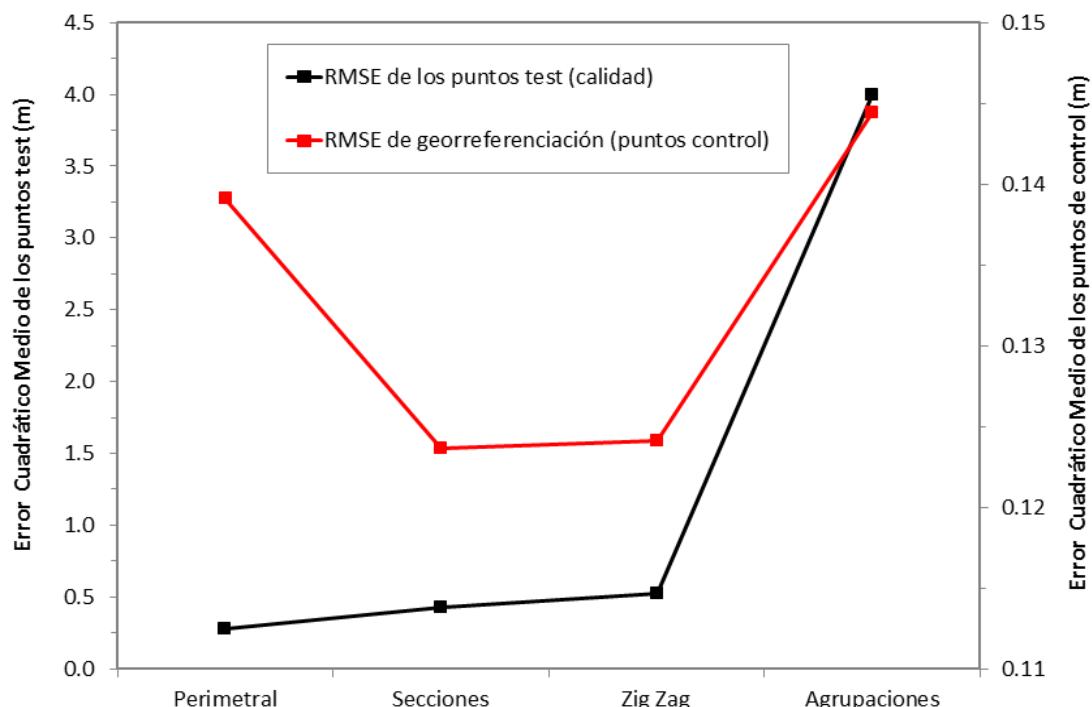


Figura 32. Distribución de los errores cuadráticos medios de los puntos de control (error de post-proceso o georreferenciación) y de los puntos test o *check* (calidad o exactitud del modelo) en función de los distintos patrones de distribución espacial de los GCPs. Se han utilizado 102 GCPs para el post-proceso y 101 puntos test para el cálculo de la exactitud de los datos topográficos.

La calidad de los datos topográficos obtenidos se sitúa constante para tres de los patrones: perimetral, secciones y zigzag. El patrón de localización por agrupaciones presenta errores muy elevados (métricos; i.e. próximos a los 4 metros). Los resultados de este análisis nos indican que los errores de georreferenciación están relativamente influenciados por la localización de los puntos de control (poca diferencia absoluta entre patrones), aunque la localización de los GCPs puede determinar la calidad de la información topográfica resultante. El patrón de localización por secciones presenta los mejores resultados por lo que se refiere a la exactitud de la información topográfica obtenida, aunque la ubicación de los GCPs puede ser laboriosa. En cambio, se considera el patrón de distribución perimetral como el patrón óptimo para minimizar el tiempo de posicionamiento de los GCPs, garantizando, a su vez, errores de georreferenciación relativamente bajos (0.13 m) y calidades aceptables (0.28 m).

4.3 Validación de los modelos a partir de datos obtenidos con Laser Escáner Terrestre

La información topográfica obtenida mediante SfM utilizando la totalidad de GCPs (n= 203) se ha comparado con la información obtenida mediante Láser Escáner Terrestre (TLS) en el puente de Laspuña (ver Figura 26). Para la comparación de la información topográfica se ha utilizado el software libre Cloud Compare v2.5.3®. Se ha calculado el vector resultante de comparar la localización 3D de dos observaciones topográficas; en este caso Obs SfM y Obs TLS. Cabe destacar que el número de observaciones comparadas estará en función de la base de datos con el menor número de información.

Los dos estacionamientos del TLS se han registrado en el mismo sistema de coordenadas, mediante 4 dianas coincidentes en ambos estacionamientos. El error en el registro de la información es de 0.005 metros. Se ha exportado la nube de puntos dentro de las dos superficies a comparar: (i) superficies lisas (i.e. sin mucha variación; el asfalto del puente), y (ii) superficies rugosas (i.e. con una relativa variabilidad topográfica, sección de roca madre con escarpes). A continuación se presentan los resultados para cada una de estas.

4.3.1 Comparación de la nube de puntos en superficies lisas

La figura 33 muestra la curva de frecuencias acumulada de los resultados para la superficie lisa. Un total de 3287 observaciones topográficas obtenidas con SfM fueron comparadas con los valores de TLS más próximos a cada una de ellas. Cabe destacar que, para la misma superficie de análisis, se disponía de más de 390000 observaciones TLS. Esto se debe a la proximidad de los estacionamientos, y es muy importante, ya que garantiza que la comparación de observaciones no se vea afectada por una baja densidad de éstas. Los errores oscilan entre 0.1 y 0.8 metros. La mediana de la distribución de los errores está alrededor los 0.4 metros; 2 veces superior al error de post-proceso descrito anteriormente. El percentil 84 de la curva es de alrededor los 0.5 metros.

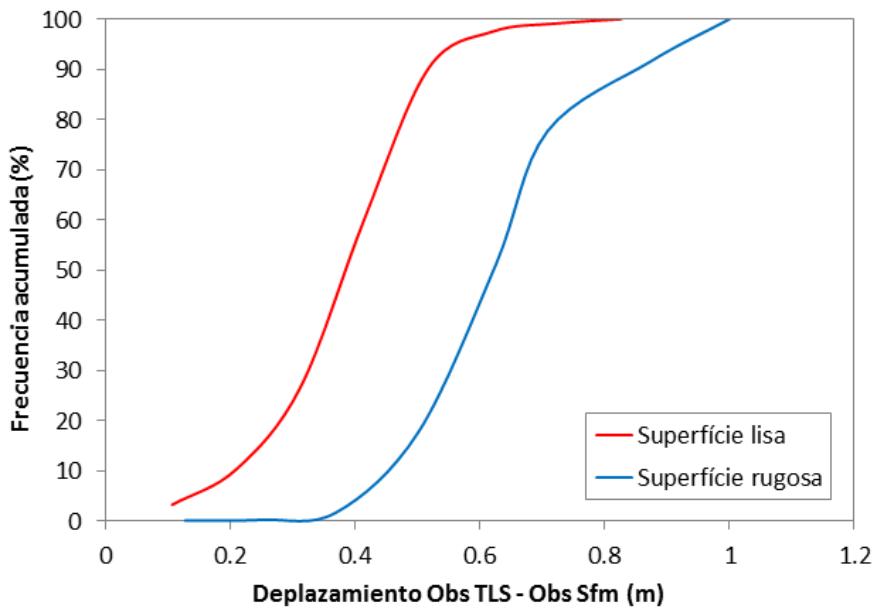


Figura 33. Curva de frecuencias acumulada de la longitud de los vectores resultantes al comparar observaciones topográficas obtenidas mediante SfM (Obs SfM) y TLS (Obs TLS). Se presentan dos curvas para las dos superficies evaluadas: (i) superficie lisa y (ii) superficie rugosa.

4.3.2 Comparación de la nube de puntos en superficies rugosas

La exactitud de un total de 933 observaciones topográficas obtenidas mediante SfM en una superficie rugosa ha sido evaluada. Estas observaciones, se han comparado con los valores obtenidos con TLS (más de 500000 observaciones para la misma área de análisis). La figura 33, muestra la curva de frecuencias acumulada de los resultados. En este caso, la exactitud de los resultados es inferior. Los errores oscilan entre 0.13 y 1 metros. La mediana de la distribución de los errores es de alrededor los 0.6 metros; superior a la obtenida en la superficie lisa y 3 veces superior al error de post-proceso. El percentil 84 de la curva es de alrededor de los 0.8 metros. Los resultados de este análisis muestran, cómo la exactitud de la información topográfica obtenida mediante SfM depende, no solo del establecimiento de una red de puntos de control de elevada calidad y óptimo posicionamiento (tal y como se ha analizado en el apartado anterior), sino también de la propia complejidad de la superficie a caracterizar. Estos resultados, pueden ser de gran interés para el cálculo de incertidumbres de los modelos topográficos obtenidos mediante esta técnica. A su vez, dichas incertidumbres son fundamentales cuando se comparan dos superficies a lo largo de distintos intervalos de tiempo, para estimar los cambios volumétricos asociados a episodios de deformación (e.g. cambios topográficos en cauces fluviales después de episodios de movilidad), tal y como se apunta en el siguiente apartado.

5. APLICABILIDAD: FOTOGRAFÍA DIGITAL AUTOMATIZADA Y GEOMORFOLOGÍA

En los anteriores apartados se ha presentado y evaluado la fotogrametría digital como técnica de obtención de información topográfica de elevada densidad. Esta técnica propicia nuevas oportunidades en el campo de la geomorfología. A modo de ejemplo, en la pasada Reunión Nacional de Geomorfología (Cáceres, septiembre de 2014) son numerosos los estudios que se presentaron en los que SfM es la herramienta principal para obtención de información topográfica.

Tal y como se apuntó en la introducción, la elaboración de modelos digitales del terreno (MDT) o de superficies (MDS) es fundamental para (a) la caracterización de superficies, (b) para el estudio evolutivo de éstas y (c) para la modelización de éstas o para la parametrización de modelos en los que la topografía sea una variable clave para su parametrización. En muchos casos, aunque el objetivo sea tan solo la caracterización de superficies, la deformación de éstas o el acceso limitan la aplicación de técnicas invasivas como las Estaciones Totales o sistemas GPS de elevada precisión (diferenciales con RTK). SfM puede facilitar la obtención de información topográfica en este tipo de superficies. La figura 34 muestra un ejemplo de esta aplicabilidad. Se trata de información topográfica obtenida en glaciar del Monte Perdido. A partir de fotos oblicuas obtenidas desde la base del glaciar ($n=65$); se han generado dos nubes de puntos topográficas de diferente densidad y una ortofoto 3D de alta resolución.

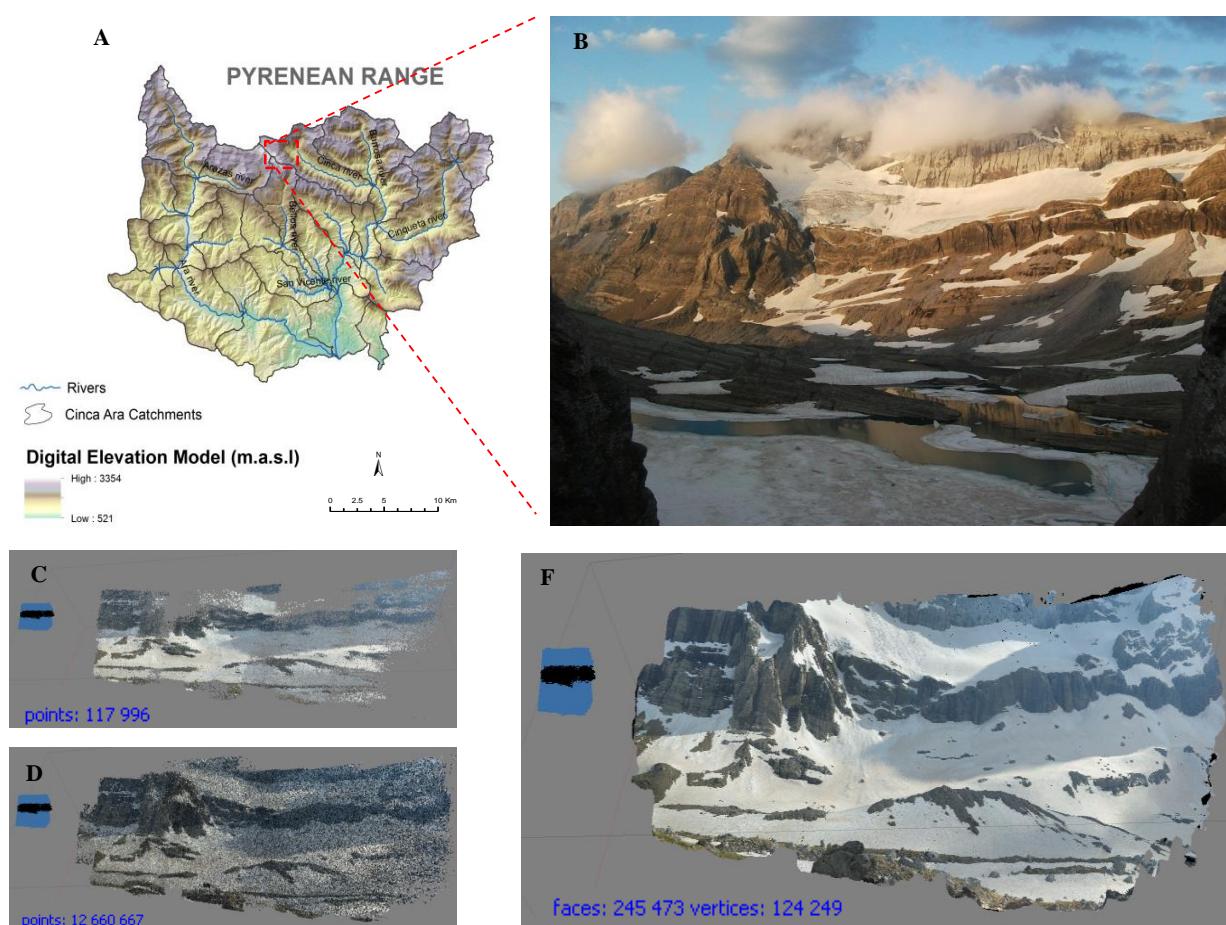


Figura 34. Información topográfica en superficies de difícil acceso: glaciares. (A) localización del glaciar del Mte Perdido. (B) fotografía del cuerpo glaciar. (C) nube de puntos generada de baja densidad. (D) nube de puntos generada de media densidad (F). Ortofoto (resolución: 0.29 m). Productos obtenidos en coordenadas locales. Fecha imágenes y productos generados: 14/06/2014.

La información generada está en un sistema de coordenadas local, al no establecerse una red de control que permita la georreferenciación, aunque hay puntos fijos establecidos en el glaciar por campañas previas de otros grupos de investigación, que actualmente monitorizan los cambios topográficos de la zona (i.e. cambios anuales-estacionales de la cobertura de hielo y nieve). Este es un claro ejemplo de aplicación de técnicas SfM en lugares de difícil acceso, donde la reducción de costes (i.e. temporal, económico) respecto de otras técnicas (i.e. TLS) hace que sea indiscutible su aplicabilidad, aunque se debe comparar previamente si la calidad de la información topográfica puede posibilitar esta sustitución.

Los avances en las técnicas de fotogrametría digital automatizada se están beneficiando de otros avances tecnológicos relacionados con la aparición de plataformas automatizadas para la toma de fotos. Nos referimos a los UAVs (*Unmanned Aerial Vehicle*; vehículo aéreo no tripulado). La aparición de estas plataformas ha tenido un crecimiento exponencial en la última década. Actualmente el coste de estas plataformas es muy bajo y su aplicabilidad no requiere una elevada experiencia. Así, la combinación SfM y UAV permite la programación de vuelos para la obtención de fotografías aéreas a múltiples escalas, tanto espaciales (relacionado altura de vuelo) como temporales (múltiples, i.e. análisis de cambio).

La geomorfología estudia las formas, su evolución y las causas de ésta. Así, la comparación de superficies topográficas es determinante para entender la evolución de las superficies y los procesos responsables. En este sentido, desde nuestro punto de vista, SfM puede ser una técnica determinante en la comprensión de algunos procesos. SfM dispone de la trilogía coste-rapidez-resolución. El coste de aplicar estas técnicas es relativamente bajo si lo comparamos con técnicas de Láser Terrestre (TLS). Además, tal y como se ha descrito en este trabajo, la correcta aplicación de un flujo de trabajo optimiza la adquisición de la información requerida para generar topografía mediante SfM (rapidez). Y, finalmente, tal y como se ha evaluado en el apartado final de ese proyecto, una correcta localización (y densidad) de los puntos de control mejora sustancialmente la calidad de la información topográfica resultante. Aunque, seguramente mejorará la resolución o calidad de estas técnicas, a día de hoy, la resolución permite el estudio de procesos de magnitud moderada (cambios decimétricos entre superficies). La figura 35 muestra un ejemplo de análisis de cambio. En este caso se trata de la evolución topográfica de la barra ubicada en la zona del camping Peña Montañesa (Alto Cinca, misma zona en la que se ha obtenido el MDT; figura 35). Se han calculado los cambios topográficos de esta barra después de un periodo con caudales de elevada magnitud y competentes (caudal máximo medio diario de $800 \text{ m}^3/\text{s}$). El periodo de análisis transcurre entre junio y octubre de 2013. Se han generado dos MDT, uno para cada periodo. Cabe destacar que, en el marco del proyecto MoprhSed, se dispone del vuelo de junio de 2013 y, consecuentemente, de información topográfica para este periodo. Los MDT se han generado siguiendo la aproximación descrita en la sección 4.1.3 (filtro mediante TopCat). Los MDTs se han comparado mediante un simple cálculo de álgebra de mapas. Se le ha restado al MDT más reciente (i.e. octubre) los valores del MDT más antiguo (i.e. junio). El resultado es una diferencia de MDTs o lo que se conoce de manera internacional como un *DEM of Difference* o DoD. En este caso, valores positivos indican sedimentación, mientras que valores negativos erosión. Tal y como se puede observar, el proceso dominante durante este periodo es de sedimentación. Tan solo se observan procesos erosivos en algunos de los canales que diseccionan la barra en la parte superior, y en algunos márgenes con escarpe del margen izquierdo. A partir de esta información se podrían extraer volúmenes y con la posibilidad de estudiar el balance sedimentario en esta unidad. De manera específica, a destacar el gran interés de esta zona, ya que la administración ha detectado numerosos problemas de estabilidad en la

escollera del margen derecho. Actualmente se está actuando en ella para cambiar el trazado del cauce y reducir la erosión en el margen derecho. La necesidad de realizar esta actuación, surgió debido a los efectos de las crecidas de verano de 2013. Así, el estudio evolutivo de superficies podría ser determinante para cuantificar los procesos erosivos y sedimentarios para, por ejemplo, a nivel aplicado, una correcta protección de infraestructuras. Los resultados de la figura 35 indican claramente, como la sedimentación de material en la barra propició un gradiente lateral hacia el margen derecho y, consecuentemente, un aumento de la energía incidente en los pies de la escollera. La interpretación de DoD puede ser determinante para estudiar los mecanismos dominantes en los cambios de trazado de los lechos de los ríos de gravas.

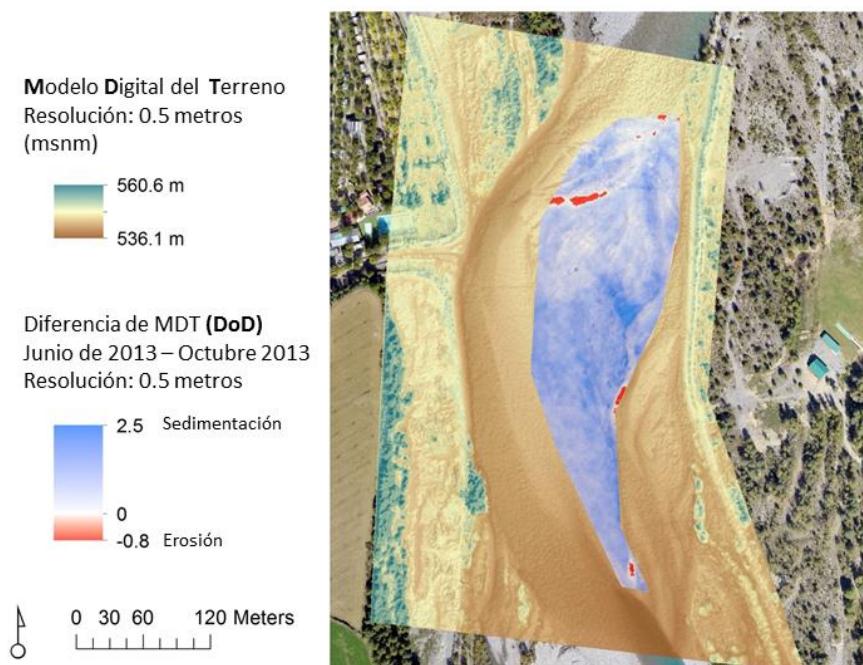


Figura 35. Comparación de Modelos Digitales del Terreno (DoD) en el Alto Cinca (escala de barra, zona del camping Peña Montañesa). Se comparan los modelos obtenidos en junio y octubre de 2013, después de un período con caudales de elevada magnitud y competentes. Se presenta la ortofoto de 5 cm de resolución y el MDT de octubre de 2013 como referencia.

Tal y como se ha podido observar en este proyecto, son numerosas las oportunidades que ofrece SfM. Aunque la calidad de la información topográfica obtenida puede ser categorizada como aceptable, es necesario un análisis crítico de ésta, sobre todo, cuando el objetivo es comparar la dinámica o evolución topográfica de una superficie. Los resultados al comparar dos MDTs estarán directamente influenciados por la calidad de cada uno de éstos (ver Wheaton et al., 2010 para un análisis detallado de incertidumbre topográfica al comparar MDTs). Así, si la calidad de los MDTs es baja, algunos de los cambios topográficos observados pueden ser inciertos, ya que podrían ser el resultado de una baja calidad de la información primaria (i.e. topografía). A modo de ejemplo, siguiendo la aproximación de Brasington et al. (2000), se puede estimar el error total al comparar dos MDTs mediante:

$$\text{Error Total} = \sqrt{e1^2 + e2^2}$$

donde,

- $e1$ es el error del Modelo Digital del Terreno 1 (tiempo 1, más viejo)
- $e2$ es el error del Modelo Digital del Terreno 2 (tiempo 2, más reciente)

Así, por ejemplo, si consideramos que los MDTs que estamos analizando tienen un error de 0.4 metros (similares a los obtenidos en este estudio), el error total al comparar los dos modelos estaría alrededor de los 0.57 metros. De manera general, todos aquellos valores del DoD inferiores a 0.57 (\pm) tendrían que ser categorizados como inciertos.

La aplicabilidad de SfM para el estudio de los cambios topográficos estará muy relacionada con la magnitud de los cambios a estudiar, de la complejidad de la topografía a comparar, y de la escala espacial de estudio. Un correcto diseño metodológico es necesario para optimizar el uso de esta técnica y garantizar resultados con una menor incertidumbre posible.

6. CONCLUSIONES

En este trabajo final de máster se ha diseñado, evaluado y aplicado un flujo de trabajo para la obtención de información topográfica de elevada densidad mediante fotogrametría digital automatizada (SfM). Mediante la aplicación de esta técnica en el tramo alto del río Cinca (Pirineo Aragonés), se ha hecho un análisis crítico de errores, asociados, mayoritariamente, a la georreferenciación de la información. Se ha analizado el efecto de la densidad de puntos de control y de diferentes patrones de localización de éstos. La exactitud o calidad de la información obtenida se ha evaluado mediante puntos test o *check*. Adicionalmente, la información topográfica obtenida mediante SfM se ha validado con datos de elevada precisión y resolución obtenidos con Láser Escáner Terrestre (TLS). Esta validación, se ha realizado de manera independiente para superficies lisas y superficies rugosas, con el objetivo de estudiar el posible efecto de la complejidad topográfica sobre la calidad de la información resultante. Por último, se presentan dos ejemplos de aplicabilidad de estas técnicas en el campo de la geomorfología. El trabajo incluye también, una caracterización detallada del área de estudio mediante la aplicación de SIG y herramientas de teledetección aprendidas durante el transcurso del máster.

En un estudio reciente de Woodget et al., (2014) se identifican las principales líneas de investigación en las que se debería trabajar para la mejora de las técnicas de fotogrametría digital (aplicado en el campo de la geomorfología fluvial, pero de interés general). Una de las líneas identificada por los autores, corresponde al análisis crítico de la calidad de la información topográfica obtenida en base a la orientación de la cámara, al solapamiento entre fotografías y, directamente relacionado con este proyecto, en base a la densidad de los puntos de control (GCPs). De esta forma, se considera que este proyecto puede ser de gran utilidad para la comunidad científica. Esta utilidad no sólo recae en el análisis de errores, sino también en el flujo de trabajo que se presenta y describe detalladamente. Las principales conclusiones que se extraen de este proyecto final de máster son:

1. Los recientes avances tecnológicos están favoreciendo el surgimiento de nuevas oportunidades para la obtención de información topográfica de elevada resolución, a un bajo coste y a una velocidad sin precedentes. La fotogrametría digital automatizada o *Structure from Motion* (SfM) es una técnica que está siendo ampliamente utilizada, aunque, tal y como apunta este proyecto, su correcta utilización requiere de un diseño metodológico específico y flujos de trabajo complejos para minimizar los errores y aumentar la calidad de la información resultante.
2. La aplicación de SfM permite obtener nubes de puntos de distintas densidades y ortofotos de elevada resolución (relacionada con la altura y calidad de las imágenes). Las ortofotos pueden ser de gran interés para generar productos adicionales mediante la aplicación de técnicas de geoestadística (fuera del ámbito de estudio de este proyecto pero de gran interés para la comunidad).
3. El análisis de errores muestra que, aunque los errores de georreferenciación sean bajos, es necesario un análisis de calidad de la información topográfica mediante puntos test (*check points*). Una reducción de los puntos de control que se utilizan para el post-proceso y georreferenciación de la información puede aparentar una reducción del error de georreferenciación. La reducción de los GCPs facilita el cálculo de los parámetros de transformación, pero reduce sustancialmente la calidad de la información topográfica resultante (e.g. 20 GCPs, error georreferenciación =

0.02 m; error de los puntos test = 2.6 m). Los resultados indican como la utilización de 61 GCPs (4.7 GCPs por quilómetro lineal de río; o 0.13 GCPs/ha) garantiza errores relativamente bajos de georreferenciación (próximos a 0.10 m) y calidades aceptables (dependiendo objetivo estudio; próximos a los 0.5 m).

4. No sólo es importante una correcta densidad de puntos de control, sino que la distribución espacial de éstos (su ubicación en relación al área de estudio) también puede condicionar la calidad de la información topográfica. Aunque los resultados más favorables se han obtenido mediante un patrón de distribución por secciones, se considera el patrón de distribución perimetral como el patrón óptimo para minimizar el tiempo de posicionamiento de los GCPs garantizando, a su vez, errores de georreferenciación relativamente bajos (i.e. 0.13 m) y calidades (i.e. 0.28 m) aceptables.
5. La complejidad topográfica de las superficies determina la magnitud de los errores. La comparación de observaciones obtenidas mediante SfM con observaciones de elevada precisión y densidad adquiridas con TLS, muestra como los errores de la información obtenida con SfM son superiores en superficies rugosas que en superficies lisas. La mediana de las distribuciones de errores se sitúa alrededor de los 0.4 y 0.6 m, para las superficies lisas y rugosas respectivamente.
6. Es necesario considerar la calidad de la información topográfica cuando el objetivo de nuestro estudio es analizar los cambios topográficos entre dos o más períodos. La calidad de los modelos debería adaptarse a la magnitud de cambios esperados. La comparación de modelos de baja calidad puede generar resultados con una elevada incertidumbre en los que el cambio observado puede ser el reflejo de la baja calidad topográfica y no un cambio real. La magnitud de los errores que se presentan en este estudio, se puede reducir sustancialmente si se trabaja a escalas mayores (alturas de vuelo de 50 metros con imágenes de 1 cm de resolución; Vericat & Smith, comunicación personal). Cabe destacar que en este trabajo se presenta un modelo de elevada resolución, para un tramo fluvial de 13 km con una calidad de aproximada de 0.4 m (en su conjunto).

La fotogrametría digital automatizada es una técnica que está siendo ampliamente utilizada en multitud de áreas de conocimiento, aunque, tal y como muestra este trabajo, su correcta utilización requiere de un diseño metodológico específico y flujos de trabajo complejos para minimizar los errores y aumentar la calidad de la información resultante en base a las particularidades de las áreas de estudio y a los objetivos específicos de los estudios.

7. BIBLIOGRAFÍA

AgiSoft, 2013. Agisoft PhotoScan User Manual: Professional Edition. 1.0.0. Retrieved. June 15, 2013 from <http://www.agisoft.ru/products/photoscan/professional/>.

Batalla (2003): "Déficit de sedimento fluvial a causa de las presas y las extracciones de áridos". Revisión con ejemplos del NE de España". *Cuaternario y Geomorfología* 17(3-4): 79-91.

Beguería, Santiago; López-Moreno Juan I.; Gómez-Villar, Amelia Rubio; Virginia; Lana Renault, Noemí; García-Ruiz, José M. (2006). "Fluvial adjustements to soil erosion and plant cover changes in the Central Spanish Pyrenees". *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography*. 88, 177-186.

Brasington, J., Rumsby, B.T., McVey, R.A., (2000). "Monitoring and modeling morphological change in a braided gravel-bed river using high resolution GPS-based survey". *Earth Surface Processes and Landforms* 25, 973-990.

Brasington J., Smart RMA. (2003). "Close range digital photogrammetric analysis of experimental drainage basin evolution". *Earth Surface Processes and Landforms* 28: 231-247.

Brasington, J., Vericat, D., Rychkov I. (2012): "Modeling river bed morphology, roughness, and surface sedimentology using high resolution terrestrial laser scanning". *Water Resources Research*. 48 W11519, 1-18.

Charlton, M.E., Large, A.R.G., Fuller, I.C., (2003). "Application of airborne LiDAR in river environments: the River Coquet, Northumberland, UK". *Earth Surface Processes and Landforms* 28, 299-306.

Dandois, J.P., Ellis, E.C., (2013). "High spatial resolution three-dimensional mapping of vegetation spectral dynamics using computer vision". *Remote Sensing of Environment* 136, 259-276.

Doneus, M., Verhoeven, G., Fera, M., Briese, C., Kucera, M., Neubauer, W., (2011). "From deposit to point cloud — a study of low cost computer vision approaches for the straightforward documentation of archaeological excavations". Proc. XXIIrd International CIPA Symposium. Czech Republic, Prague.

Fonstad, M.A, Dietrich, J.T., Courville, B.C, Jensen, J.L. Carboneau, P.E (2013). "Topographic structure from motion: a new development in photogrammetric measurement". *Earth Surface Processes and Landforms* 38(4): 421-430.

Gallart, F., & Llorens, P. (2004): "Observations on land cover changes and water resources in the headwaters of the Ebro catchment, Iberian Peninsula". *Physics and Chemistry of the Earth* 29: 769-773.

- García-Ruiz, J.M. and Valero-Garcés, B., (1998): "Historical geomorphic processes and human activities in the Central Spanish Pyrenees". *Mountain Research and Development*, 18: 309–320.
- Heritage, G. & Hetherington D. (2007). "Towards a protocol for laser scanning in fluvial geomorphology". *Earth Surface Processes and Landforms* 32: 66-74.
- Hilldale, R.C., Raff, D., (2008). "Assessing the ability of airborne LiDAR to map river bathymetry". *Earth Surface Processes and Landforms* 33, 773–783.
- Hodge, R., Brasington, J., Richards, K. (2009): "In situ characterization of grain-scale fluvial morphology using Terrestrial Laser Scanning". *Earth Surface Processes and Landforms* 34, 954–968.
- James M.R, & Robson, S. (2012). "Straightforward reconstruction of 3D surfaces with a camera: Accurazy and geoscience application" *Journal of Geophysical Research: Earth Surfaces* 117 (F3), F03017.
- Javernick, L., Brasington, J., Caruso B.,(2014). "Modelling the topography of shallow braided rivers using Structure-from-Motion photogrammetry". *Geomorphology* 213, 166-182.
- Kondolf, G.M. (1994): "Geomorphic and environmental effects of instream gravel mining". *Landscape and Urban Planning*. 28, 225-243.
- Lane, S.N., James, T.D., Crowell,M.D., (2000). "Application of digital photogrammetry to complex topography for geomorphological research". *The Photogrammetric Record* 16, 793–821.
- Lowe, D., (2004). "Distinctive image features from scale-invariant keypoints. International" *Journal of Computer Vision* 60, 91–110 (440).
- Niethammer U., James MR., Rothmund. S., Travelletti J., Joswig M. (2012). "UAV-based remote sensing of the Super-Sauze landslide: Evaluation and results". *Engineering Geology* 128: 2-11.
- Rubio Fernandez, Virginia (1995). "Dinámica fluvial del río Ara (Pirineo Aragonés)". Tesis Doctoral. Universidad Autónoma de Madrid (Dpto. de Geografía).
- Schumm, S.A. (1977). "The fluvial system". John Wiley and Sons, New York. 338p.
- Tamminga A., Hugenholtz C., Eaton B., Lapointe M. (2014). "Hyperspatial remote sensing of channel reach morphology and hydraulic fish habitat using an unmanned aerial vehicle (UAV); a first assessment in the context of river research and management". *River Res. Applic.* DOI: 10.1002/rra.2743.
- Tarolli, P., Arrowsmith, J.R., Vivoni, E.R.,(2009). "Understanding earth surface processes from remotely sensed digital terrain models". *Geomorphology* 113, 1–3.

- Tarolli, P.,(2014). "High-resolution topography for understanding Earth surface processes: Opportunities and challenges ". *Geomorphology* 216, 295–312.
- UE & Gobierno de Aragón (2007): Atlas Climático de Aragón.
- Ullman, S. (1979). "The Interpretation of Structure from Motion". *Proc. R. Soc. Lond. B* 1153: 405-426.
- Verdú, J.M., Batalla, R.J., Martínez-Casasnovas, J.A. (2005): "High-resolution grain-size characterisation of gravel bars using imagery analysis and geo-statistics". *Geomorphology* 72:73-93.
- Vericat D, Brasington J, Wheaton J, Cowie M. (2009). "Accuracy assessment of aerial photographs acquired using lighter-than-air blimps: low-cost tools for mapping river corridors". *River Research and Applications* 25(8): 985–1000.
- Westaway, R.M., Lane, S.N., Hicks, D.M., (2003). "Remote survey of large-scale braided, gravel-bed rivers using digital photogrammetry and image analysis". *International Journal of Remote Sensing* 24, 795–815.
- Westoby, M.J.; Brasington, J.; Glasser N.F.; Hambrey, M.J.; Reynolds, J.M. (2012): "Structure from-Motion' photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications". *Geomorphology* 179: 300-314.
- Wheaton, J.M., Brasington, J., Darby, S.E., Sear, D., (2010). "Accounting for uncertainty in DEMs from repeat topographic surveys: improved sediment budgets". *Earth Surface Processes and Landforms* 35, 136–156.
- Wheaton, J.M., Brasington, J., Darby, S.E., Kasprak, A., Sear, D., Vericat, D., (2013). "Morphodynamic signatures of braiding mechanisms as expressed through change in sediment storage in a gravel-bed river". *Journal of Geophysical Research — Earth Surface* 118, 759–779.
- Williams, R., Brasington, J., Hicks, D.M., Measures, R., Rennie, C.D., Vericat, D., (2013a). "Hydraulic validation of two-dimensional simulations of braided river flow with spatially continuous aDcp data". *Water Resources Research* 49, 5183–5205.
- Williams, R. D., Brasington, J., Vericat, D. and Hicks, D. M. (2013b). "Hyperscale terrain modelling of braided rivers: fusing mobile terrestrial laser scanning and optical bathymetric mapping". *Earth Surf. Process. Landforms*, 39: 167–183. doi: 10.1002/esp.3437.
- Woodge, A.S., Carbonneau, P.E., Visser, F., Maddock, I. (2014): "Quantifying submerged fluvial topography using hyperspatial resolution UAS imagery and structure from motion photogrammetry". *Earth Surface Processes and Landforms* (early view); doi: 10.1002/esp.3613.